

# Ein Beitrag zur Situationsanalyse im vorausschauenden Fußgängerschutz

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und  
Verfahrenstechnik der Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von  
Nils Tiemann  
aus  
Gütersloh

Referent: Professor Dr.-Ing. Dieter Schramm  
Korreferenten: Univ.-Professor Dr.-Ing. Dirk Söffker  
Apl. Professor Dr.-Ing. habil. Peter Knoll

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Mai 2012



# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Doktorand und Mitarbeiter in der Forschungsabteilung für Fahrsicherheits- und Assistenzsysteme der Robert Bosch GmbH in Schwieberdingen.

Zunächst möchte ich Herrn Professor Dieter Schramm, Leiter des Lehrstuhls für Mechatronik an der Universität Duisburg-Essen für seine hervorragende Betreuung danken. Trotz der räumlichen Distanz konnte er bei regelmäßigen Treffen in Stuttgart und Duisburg wertvolle Hinweise und klare Rahmenbedingungen für die vorliegende Arbeit geben. Sein großes Interesse an der Arbeit und die fachliche Tiefe zeigten sich bei diversen Anmerkungen und persönlichen Gesprächen. Ebenso möchte ich ihm für die Möglichkeit danken, am Doktorandenseminar des Lehrstuhls teilnehmen zu können, welches einen intensiven Austausch mit den Kollegen des Lehrstuhls sowie anderen Doktoranden ermöglichte.

Dr. Wolfgang Branz hat mich während meiner Doktorandenzeit bei der Robert Bosch GmbH betreut und entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ohne seinen fachlichen Rat, welchen ich in jeder Situation suchen konnte, wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Als Projektleiter ist es ihm stets gelungen, die richtigen Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Arbeit zu schaffen. Von seiner Erfahrung haben ich und diese Arbeit entscheidend profitiert, vielen Dank!

Professor Dirk Söffker, Leiter des Lehrstuhls Steuerung, Regelung und Systemdynamik an der Universität Duisburg-Essen danke ich für die Übernahme des Zweitberichts und für die wertvollen Anregungen zur Vervollständigung dieser Arbeit.

Professor Peter Knoll vom Karlsruher Institut für Technologie danke ich für die Übernahme des Drittberichts und für das entgegengebrachte Interesse an der Arbeit.

Meinen Kollegen der Robert Bosch GmbH möchte ich herzlich für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit danken. Insbesondere den Kollegen des Predictive-Active-Safety Projekts danke ich für viele erfolgreiche und aufregende Stunden. Die gemeinsame Zeit beim Testen und Tüfteln im Versuchsträger und bei den zahllosen Präsentationen wird mir immer in Erinnerung bleiben.

Den Kollegen vom Lehrstuhl Mechatronik der Universität Duisburg-Essen danke ich für die freundliche Aufnahme in ihren Kreis und diverse anregende sowie angenehme Stunden während gemeinsamer Besuche des Doktorandenseminars.

Allen Mitdoktoranden des Doktorandenprogramms der Robert Bosch GmbH möchte ich ebenfalls herzlich danken. Der fachliche Austausch, aber auch gerade der nicht fachliche war sehr wertvoll für mich.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die stets an das Gelingen der Arbeit geglaubt haben und mich in allen Phasen unterstützt haben. Vielen Dank euch allen!

Ludwigsburg, Juli 2012

Nils Tiemann

# Abstract

The subject of this thesis is the development and prototypical realization of a driver assistance system with the purpose of predictive pedestrian protection. The system shall help the driver to avoid collisions with pedestrians by issuing a noticeable warning to the driver prior to a possible collision. If the driver fails to react to the warning and the criticality of the situation increases, the system will initiate an automatic braking intervention in order to prevent or mitigate the collision.

One of the main challenges for the system is to correctly estimate the risk of an impending collision. For a successful driver warning it is necessary to issue the warning early enough, enabling the driver to react. Therefore, the time before the collision, at which the decision to warn the driver is made, has to be significantly longer than the reaction time of the driver (up to 2 s). Because of this comparatively long timespan it is vital for the system to predict the possible movements of the pedestrian as accurately as possible. This also holds true for the automatic braking intervention. With a high assumption placed upon the movement capabilities of pedestrians, the decision for an automatic braking is not possible up to a few hundred milliseconds before the collision, rendering the benefit of the system comparatively small.

Therefore, the first part of the thesis concentrates on the development of a situation analysis approach which considers the movement capabilities of pedestrians. The possible and relevant trajectories of pedestrians in typical accident scenarios are analyzed and contribute to the development of the pedestrian motion model. For this model, a test study is designed and conducted to measure the movement capabilities of different test persons in relevant situations. The results of the study are analyzed and integrated into the model. The prediction of the movement capabilities depends on the current velocity of the pedestrian, as well as the available time and direction of movement, which yields significant improvements of the results in the situation analysis. The results show that a decision for an automatic braking intervention based upon the prediction of an unavoidable collision can be made earlier which leads to a reduction in the collision velocity.

The second part of the thesis analyzes the sensor system which is used to recognize pedestrians in front of the vehicle and the impact of this system's errors in the situation analysis. The prototypical realization of the system uses a stereo-vision system in order

to detect pedestrians and to measure relevant data, for instance position and velocity of the pedestrian relative to the vehicle. The quality of this data is vital for the system to function, therefore, the implications of erroneous data are analyzed, and the requirements for the relevant input data are derived. For this purpose, a sensitivity analysis with a series of simulations is conducted. The artificial sensor data in the simulations is superimposed by artificial noise in order to determine the acceptable degree of noise for the system. The type of noise depends on the data and is derived from the analysis (theoretical as well as practical) of the stereo-vision system.

The thesis is concluded by presenting the test-vehicle and an analysis of the system performance in 50 hours of test driving in urban areas.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund und Motivation . . . . .	1
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Fußgängerschutz</b>	<b>5</b>
2.1 Unfallgeschehen Fußgänger . . . . .	5
2.2 Problemanalyse und Maßnahmen im Fußgängerschutz . . . . .	8
2.2.1 Fahrer und System im Vergleich . . . . .	8
2.2.2 Ideale Systeme . . . . .	11
2.3 Vorhandene Fußgängerschutzmaßnahmen . . . . .	12
2.3.1 Passive Maßnahmen . . . . .	13
2.3.2 Maßnahmen zur Wahrnehmungsverbesserung . . . . .	14
2.3.3 Aktive, vorausschauende Sicherheitssysteme . . . . .	14
2.4 Anforderungen an eine vorausschauende Fußgängerschutz-Funktion . . .	18
2.4.1 Anforderungen an eine Fahrer-Warnfunktion . . . . .	19
2.4.2 Anforderungen an eine automatische Notbremsfunktion . . . . .	23
2.4.3 Allgemeine Anforderungen an die Umfeldsensorik . . . . .	24
2.5 Problemstellung und Vorgehensweise . . . . .	25
<b>3 Situationsanalyse</b>	<b>27</b>
3.1 Einordnung des Begriffs . . . . .	27
3.2 Literaturübersicht - Stand der Technik . . . . .	28
3.2.1 Allgemeine Übersicht . . . . .	28
3.2.2 Kategorisierung . . . . .	29
3.2.3 Ad-hoc Ansätze . . . . .	29
3.2.4 Geometrische Ansätze . . . . .	31
3.2.5 Physikalische Ansätze . . . . .	32
3.2.6 Stochastische Ansätze . . . . .	33

3.2.7	Fazit . . . . .	35
3.3	Entwicklung des PMM - Ansatzes . . . . .	38
3.3.1	Grundidee . . . . .	38
3.3.2	Modellierung der Fußgängerbewegung . . . . .	39
3.3.3	Funktionsausprägung und Sicherheitsbereiche . . . . .	46
3.3.4	Fahrkorridor . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Das Bewegungsmodell</b>	<b>49</b>
4.1	Motivation . . . . .	49
4.1.1	Bisherige Studien . . . . .	50
4.1.2	Fußgängergeschwindigkeit im realen Unfallgeschehen . . . . .	51
4.2	Bewegungszustände . . . . .	52
4.3	Probandenstudie . . . . .	54
4.3.1	Testbedingungen . . . . .	55
4.3.2	Durchführung . . . . .	56
4.4	Auswertung . . . . .	57
4.4.1	Qualität des Signals . . . . .	57
4.4.2	Filterung und Berechnung der Beschleunigung . . . . .	58
4.4.3	Bestimmung der Mean Uniform Acceleration . . . . .	59
4.4.4	Bestimmung der mittleren Bewegungsmöglichkeiten . . . . .	62
4.5	Ergebnisse . . . . .	65
4.5.1	Positive Übergänge . . . . .	65
4.5.2	Negative Übergänge . . . . .	69
4.5.3	Fazit . . . . .	72
4.6	Das Modell in der Situationsanalyse . . . . .	75
4.6.1	Bewertung der positiven Trajektorie . . . . .	76
4.6.2	Bewertung der negativen Trajektorie . . . . .	78
4.6.3	Bewertung der gemischten Trajektorie . . . . .	80
4.6.4	Gesamtbewertung der Trajektorien . . . . .	81
4.7	Ergebnisse in der Situationsanalyse . . . . .	83
4.8	Das erweiterte Modell . . . . .	87
<b>5</b>	<b>Situationsanalyse im Vergleich</b>	<b>91</b>
5.1	Berücksichtigte Ansätze . . . . .	91
5.2	Entwicklungsumgebung . . . . .	93
5.3	Simulation . . . . .	93
5.3.1	Positive Szenen . . . . .	93
5.3.2	Negative Szenen . . . . .	95
5.3.3	Fazit . . . . .	97



5.4	Test mit realen Daten . . . . .	97
5.4.1	Positive Szenen . . . . .	98
5.4.2	Negative Szenen . . . . .	99
5.5	Fazit . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Fehlermodell</b>	<b>103</b>
6.1	Stereo-Video: Grundlagen . . . . .	103
6.1.1	Messprinzip Stereo-Video . . . . .	104
6.1.2	Fußgänger Klassifikation . . . . .	105
6.1.3	Fehlerquellen . . . . .	106
6.2	Stereo-Video: Praxis . . . . .	111
6.2.1	Referenzierung . . . . .	111
6.2.2	Vorgehen . . . . .	112
6.2.3	Attributgüten . . . . .	112
6.2.4	Klassifikation . . . . .	114
6.3	Fehlermodellierung . . . . .	115
6.3.1	Attributgüten . . . . .	116
6.3.2	Klassifikation . . . . .	120
6.4	Einfluss auf das Gesamtsystem . . . . .	123
6.4.1	Fußgänger-Szenen . . . . .	123
6.4.2	FP Szenen . . . . .	128
<b>7</b>	<b>Das Gesamtsystem</b>	<b>131</b>
7.1	Reaktionsschema und Human-Machine-Interface . . . . .	131
7.2	Absicherung . . . . .	132
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
<b>A</b>	<b>Ergebnisse der Situationsanalyse</b>	<b>139</b>
<b>B</b>	<b>Entwicklungsumgebung und Simulation</b>	<b>141</b>
B.1	Online-Betrieb . . . . .	141
B.2	Nachsimulation . . . . .	142
B.3	Simulation . . . . .	142
<b>C</b>	<b>Fußgänger-Szenen</b>	<b>145</b>
C.1	Positive Szenen . . . . .	145
C.2	Negative Szenen . . . . .	148
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>



# Abkürzungen und Formelzeichen

## Häufige Abkürzungen

$CU$	Collision Unavoidable (Kollision unvermeidbar)
$CU_{ped}$	Collision Unavoidable by Pedestrian (Kollision unvermeidbar für den Fußgänger)
$CU_{ped}^{comf}$	Collision Unavoidable by Pedestrian within comfortable Limits (Kollision für den Fußgänger nicht mehr komfortabel zu vermeiden)
$DC$	Ein stochastischer Ansatz zur Situationsanalyse, der auf einem Discrete-Choice Model basiert
$DTP$	Distance to Pedestrian (Abstand Fahrzeug Fußgänger)
$EB_1$	Emergency Brake 1: Erste Stufe einer möglichen Notbremsung
$EB_2$	Emergency Brake 2: Zweite Stufe einer möglichen Notbremsung
$F$	Ergebnis der Trajektorienbewertung für einen Fußgänger: Feasible (möglich)
$FP$	False Positive (fälschlicherweise als Fußgänger erkanntes Objekt)
$FN$	False Negative (nicht erkannter Fußgänger)
$FWR$	Fehlwarnrate
$GEO$	Ein geometrischer Ansatz zur Situationsanalyse
$HMI$	Human-Machine-Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
$ND$	No Danger (Situation ungefährlich)
$NF$	Ergebnis der Trajektorienbewertung für einen Fußgänger: Not Feasible (nicht möglich)
$NF_{ped}$	Ergebnis der Trajektorienbewertung für einen Fußgänger: Not Feasible for Pedestrian (nicht möglich für den Fußgänger allein)
$NF_{ped}^{comf}$	Ergebnis der Trajektorienbewertung für einen Fußgänger: Not Feasible for Pedestrian within comfortable Limits (nicht möglich für den Fußgänger innerhalb der angenommenen Komfortgrenzen)

$NF_{ped}^{min}$	Ergebnis der Trajektorienbewertung für einen Fußgänger: Not Feasible for Pedestrian within minimal Limits (nicht möglich für den Fußgänger unter Annahme einer minimalen Bewegungsänderung)
$PD$	Potentially Dangerous (Situation potenziell gefährlich)
$PMM$	Pedestrian Motion Model
$PW$	Pre-Warn: erste Warnstufe, bei der eine Vorwarnung an den Fahrer erfolgt
$RND$	Ein stochastischer Ansatz zur Situationsanalyse, der auf einem Random-Walk Model basiert
$ROI$	Region of Interest (Bildausschnitt in dem nach einem Fußgänger gesucht wird)
$SIT$	Situationsanalyse
$TTC$	Time to Collision (Zeit bis zur möglichen Kollision)
$TTP$	Time to Pedestrian (Zeit bis sich der Fußgänger auf gleicher Höhe mit dem Fahrzeug befindet)
$W$	Warn: zweite Warnstufe, bei der die Fahrerwarnung erfolgt

## Häufige Formelzeichen

$a_{ped,1}$	Beschleunigung (konstant), welche der Fußgänger aufbringen muss, um noch rechtzeitig den Rand des Fahrkorridors zu erreichen
$a_{ped,2}$	Beschleunigung (konstant), welche der Fußgänger aufbringen muss, um den Fahrkorridor nach Eintreten wieder rechtzeitig zu verlassen
$a_{ped,3}$	Beschleunigung (konstant), welche der Fußgänger aufbringen muss, um noch rechtzeitig vor dem Fahrkorridor anzuhalten
$a_{ij}$	Beschleunigungsprozess, Wiederholung $j$ von Proband $i$
$\tilde{a}_{ij}$	Modifizierter Beschleunigungsprozess, Wiederholung $j$ von Proband $i$
$dx$	Longitudinaler Abstand des Fußgängers relativ zur Fahrzeug-Front
$dy$	Lateraler Abstand des Fußgängers relativ zur Fahrzeug-Mitte
$\Delta dx$	Differenz von $dx$ Sensor zu $dx$ Referenz
$\Delta dy$	Differenz von $dy$ Sensor zu $dy$ Referenz
$\Delta vx$	Differenz von $vx$ Sensor zu $vx$ Referenz
$\Delta vy$	Differenz von $vy$ Sensor zu $vy$ Referenz

$MUA$	Mean Uniform Acceleration
$MUA_{ij}$	MUA, Wiederholung $j$ von Proband $i$
$MUA^{av}$	Die gemittelte MUA, repräsentiert durch zwei lineare Teilstücke
$N_{zyk}$	Anzahl Zyklen welche für Tracking und Plausibilisierung benötigt werden
$t_b$	Zeitpunkt vor der Kollision ab dem die Bremsung beginnt
$t_r$	Reaktionszeit des Fahrers
$t_{r,u}$	untere Schwelle für $t_r$
$t_s$	Totzeit des (Brems-)Systems
$t_{s,u}$	untere Schwelle für $t_s$
$t_{stop}$	Zeit, die ein Fußgänger zum Anhalten benötigt
$t_{turn}$	Zeit, die ein Fußgänger zum Umdrehen benötigt
$t_w$	Zeitpunkt vor der Kollision ab dem die Warnung beginnt
$t_{zyk}$	Zykluszeit der Sensorik
$v_{ego}$	Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs
$v_{ped}$	Geschwindigkeit des Fußgängers
$v_x^{rel}$	Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Fußgänger, longitudinal
$vx$	Longitudinale Geschwindigkeit eines Fußgängers oder Objekts absolut
$vy$	Laterale Geschwindigkeit eines Fußgängers oder Objekts absolut



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Seit Beginn des motorisierten Straßenverkehrs gehören Unfälle mit Verletzten und Toten zum Alltag auf deutschen wie auch internationalen Straßen. Das Risiko eines tödlichen Unfalls im Straßenverkehr ist dabei laut dem European Transport Safety Council (ETSC) in der EU etwa 40 mal höher als das eines tödlichen Arbeitsunfalls und etwa 12 mal höher als das eines tödlichen Unfalls im Haushalt (Koornstra et al. 2003). Demnach sind Unfälle im Straßenverkehr die Haupt-Todesursache in der EU für Menschen unter 50 Jahren.<sup>1</sup>

Gietinger ging 2006 in einer Schätzung davon aus, dass seit Erfindung des Kraftfahrzeugs ca. 35 Millionen Menschen durch diese Erfindung zu Tode gekommen sind (Gietinger 2006). Im Jahr 2004 schätzte die World Health Organisation (WHO), dass weltweit ca. 1,2 Millionen Menschen jährlich im Straßenverkehr sterben, dies entspricht etwa einem Verkehrstoten alle 30 Sekunden (WHO - World Health Organisation 2011).

Die weltweiten Bestrebungen die Anzahl der verletzten und verunglückten Verkehrsteilnehmer zu senken, betrifft insbesondere die Gruppe der sogenannten „ungeschützten Verkehrsteilnehmer“, also Fußgänger und Radfahrer. Deren Risiko (tödlich) verletzt zu werden, ist im Vergleich zu Pkw-Insassen deutlich erhöht. Dies spiegelt sich in der Unfallstatistik wider: So waren im Jahr 2008 15 % aller getöteten Verkehrsteilnehmer in Deutschland Fußgänger (Irtad 2011). In einigen asiatischen Ländern ist diese Quote noch deutlich höher. In Südkorea beispielsweise waren im Jahr 2008 36 % der Verkehrstoten Fußgänger, in Japan lag die Quote im gleichen Jahr bei 33 % (siehe ebenfalls Irtad 2011).

Lange Zeit betrafen Sicherheitsentwicklungen nur Fahrzeug-Insassen. Erst mit Einführung der EU-Richtlinie 2003/102/EG (siehe Kapitel 2 und für eine geschichtliche Einordnung Kühn et al. 2007) wurden passive Strukturmaßnahmen an der Fahrzeugfront vorgeschrieben, um so den Aufprall eines Fußgängers auf ein Fahrzeug abzumildern. Ein deutlich höheres Sicherheitspotenzial für schwächere Verkehrsteilnehmer bieten aktive Systeme, die die Geschwindigkeit einer Kollision deutlich verringern oder die Kollision sogar gänzlich vermeiden können (siehe beispielsweise Fröming et al. 2006; Barrios et al. 2009).

---

<sup>1</sup>Bezogen auf alle Altersklassen stellen Unfälle im Straßenverkehr die dritthäufigste Todesursache nach Krebs und Herzkrankheiten dar.

Die besondere Komplexität solcher Systeme liegt zum einen in der zuverlässigen Erkennung schwächerer Verkehrsteilnehmer vor dem Fahrzeug und zum anderen in der Prädiktion der Situation. Die Erkennung von Fußgängern vor dem Fahrzeug kann durch verschiedene Sensoren (zum Beispiel Video, Radar- oder Laser-Sensorik) erfolgen, die unterschiedliche Vor- und Nachteile bei der Fußgängererkennung aufweisen. Eine Übersicht über mögliche Sensortechnologien findet sich beispielsweise in (Gandhi und Trivedi 2006).

Für die Vermeidung oder Minderung der Folgen einer Kollision muss ein solches System bis zu mehreren Sekunden vor der eigentlichen Kollision reagieren, um entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Dabei wird die Prädiktion schwieriger je größer der Zeitraum ist, auf den sie sich bezieht. Eine Fehleinschätzung kann schwerwiegende Konsequenzen nach sich ziehen, beispielsweise eine ausgelöste Notbremsung, welche die Gefahr eines Auffahrunfalls birgt. Die Schwierigkeit der Prädiktion ist insbesondere durch die mangelnde Vorhersage der Bewegungsintention eines Fußgängers gegeben. Der Begriff Bewegungsintention meint hier die Absicht des Fußgängers, seinen aktuellen Bewegungszustand zu ändern oder beizubehalten.

Aus der Komplexität der Prädiktion einer möglichen Kollision ergibt sich die Motivation dieser Arbeit. Durch eine zuverlässige Risikoeinschätzung im Zusammenspiel mit einer robusten Erkennung ist es möglich, frühzeitig auf eine bevorstehende Gefahr zu reagieren. Im besten Fall bedeutet dies, dass der Fahrer durch eine Warnung des Systems auf die gefährliche Situation aufmerksam wird und selbst die drohende Kollision abwenden kann. Falls dies nicht mehr möglich ist (aufgrund der Reaktionszeit des Fahrers), kann das System selbstständig durch Einleitung einer Notbremsung die Folgen der Kollision mindern oder diese vermeiden. Daher ist der Hauptgegenstand dieser Arbeit die Entwicklung eines Ansatzes zur Situationsanalyse, welcher eine hinreichend genaue Prädiktion der Bewegungsmöglichkeiten (im Gegensatz zur Bewegungsintention<sup>2</sup>) von Fußgängern erlaubt, um so eine frühzeitige Aussage über eine bevorstehende Kollisionsgefahr zu ermöglichen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die eingesetzte Stereo-Videosensorik zur Fußgänger-Erkennung theoretisch und praktisch analysiert, um das Zusammenspiel von Sensorik und Situationsanalyse zu optimieren. Mithilfe dieser Ergebnisse wurde der entwickelte Ansatz prototypisch in einem Versuchsträger umgesetzt und so eine robuste Funktion zum vorausschauenden Fußgängerschutz dargestellt.

---

<sup>2</sup>Die Abschätzung der Bewegungsmöglichkeiten eines Fußgängers erlaubt mit Einschränkungen Rückschlüsse auf die Bewegungsintention, da eine Bewegungsänderung weniger wahrscheinlich ist, wenn sie für den Fußgänger nur schwer durchführbar ist. Die direkte Vorhersage der Bewegungsintention ist jedoch nicht Bestandteil dieser Arbeit.



## 1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 wird der mögliche Wirkgrad von Fußgängerschutzmaßnahmen analysiert. Dies geschieht über eine detaillierte Unfallanalyse, aus der direkte Anforderungen an eine vorausschauende Fußgängerschutzfunktion abgeleitet werden. Darüber hinaus werden die bisherigen Maßnahmen im Bereich des passiven und aktiven Fußgängerschutzes präsentiert, gefolgt von der Ableitung allgemeiner und physikalischer Anforderungen an eine warnende und auch autonom bremsende Funktion.

In Kapitel 3 wird der Begriff Situationsanalyse näher erläutert und in die Signalverarbeitungskette einer aktiven Fahrsicherheitsfunktion eingeordnet. Anschließend wird untersucht, welche Ansätze zur Situationsanalyse insbesondere im Kontext des Fußgängerschutzes bereits existieren und warum die Entwicklung eines neuen Ansatzes notwendig ist. Die Grundlagen dieses neuen Ansatzes werden vorgestellt und ein Fußgänger-Bewegungsmodell motiviert.

Kapitel 4 gibt zu Beginn eine Übersicht über bisherige Arbeiten im Bereich der Bewegungsmodellierung von Fußgängern bzw. zu bereits durchgeführten Studien in diesem Bereich. Im Anschluss daran wird die durchgeführte Probandenstudie zur Messung der Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern vorgestellt. Basierend auf den Ergebnissen der Studie wird das Bewegungsmodell entwickelt und die Umsetzung sowie die Ergebnisse der Umsetzung in der Situationsanalyse dargestellt.

Der neue Situationsanalyse-Ansatz in Kombination mit dem Bewegungsmodell wird in Kapitel 5 mit verschiedenen Ansätzen aus der Literatur praktisch verglichen. Dazu werden Testergebnisse vorgestellt, welche sowohl auf simulierten Daten als auch auf echten Sensordaten basieren. Die Bewertung erfolgt anhand der Leistung in Szenen, in denen es tatsächlich zu einer Kollision kommt und in Szenen, in denen keine Auslösung erwünscht ist.

Eine Optimierung des Systems mit Hinblick auf die Sensorik erfolgt in Kapitel 6. Dazu wird theoretisch und praktisch untersucht, welche die Fehlerquellen des eingesetzten Sensor-Systems sind, um diese anschließend modellieren zu können. Mittels dieses Fehlermodells werden danach die Anforderungen an das Sensor-System präzisiert und das Verhalten der Situationsanalyse unter dem Einfluss von bestimmten Sensorfehlern untersucht.

Die im Versuchsträger dargestellte Funktion wird in Kapitel 7 präsentiert. Hierzu zählen die umgesetzte Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI, Human-Machine-Interface) für die

Warnung des Fahrers vor einer gefährlichen Situation sowie die Leistung des Gesamtsystems<sup>3</sup>.

Abschließend werden die Resultate der Arbeit und Weiterentwicklungspotenziale in Kapitel 8 zusammengefasst.

---

<sup>3</sup>Der Begriff Gesamtsystem beschreibt die gesamte Signalverarbeitungskette von der Sensorik bis zur Ansteuerung der Aktorik im Fahrzeug

## 2 Fußgängerschutz

### 2.1 Unfallgeschehen Fußgänger

Nachdem in den letzten Jahren das Thema der Verkehrssicherheit immer mehr Bedeutung erlangt hat, wurden die Möglichkeiten für statistische Auswertungen auf diesem Gebiet ebenfalls stark verbessert. Das Thema Unfallforschung rückt mehr und mehr in den Vordergrund, insbesondere im Bereich der Fahrerassistenzsysteme, da sich mithilfe der Unfallforschung im Vorfeld abschätzen lässt, wie wirksam ein Sicherheitssystem sein kann. Untersuchungen zum Unfallgeschehen von Fußgängern finden sich beispielsweise in (Hannawald und Kauer 2004; Kühn et al. 2007; Rosén et al. 2010). Detaillierte Analysen beziehen sich in Deutschland häufig auf die GIDAS<sup>4</sup>-Datenbank (Hannawald und Kauer 2004; Meinecke et al. 2007; Kühn et al. 2007)), in der detaillierte Informationen zu Unfällen mit Verletzten in den Großräumen Hannover und Dresden gesammelt werden. Mit diesen Daten wurde auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Unfallanalyse durchgeführt, speziell im Hinblick auf nötige Informationen für ein vorausschauendes Fußgängerschutzsystem. Die Datengrundlage besteht aus 217 Unfällen, bei denen Fußgänger frontal von einem Pkw erfasst und verletzt wurden. Die Einschränkung auf Frontalunfälle ist darin begründet, dass sich die meisten Unfälle mit Fußgängerbeteiligung als Frontalunfälle klassifizieren lassen (vgl. auch Kühn et al. 2007).

In Abbildung 2.1 sind die Kollisionsgeschwindigkeiten von 194 der 217 untersuchten Unfälle kumuliert in Abhängigkeit von der Verletzungsschwere des Fußgängers aufgetragen.<sup>5</sup> Es zeigt sich, dass mehr als 90 % aller Unfälle bei Kollisionsgeschwindigkeiten unterhalb von 50 km/h auftreten. Dies ist hauptsächlich dadurch zu erklären, dass die meisten Unfälle mit Fußgängern innerorts passieren (knapp 95 % in der vorliegenden Analyse). Die Schwere der Verletzung des Fußgängers steigt mit zunehmender Geschwindigkeit an, wobei hier die Datengrundlage der Unfälle mit getöteten Fußgängern gering ist. Ein genauerer Zusammenhang zwischen der Kollisionsgeschwindigkeit und der Verletzungsschwere findet sich in (Rosén und Sander 2009).

---

<sup>4</sup>German In-Depth Accident Study, siehe auch <http://www.gidas.org> für eine nähere Beschreibung.

<sup>5</sup>In den übrigen 23 Fällen war die Kollisionsgeschwindigkeit unbekannt.

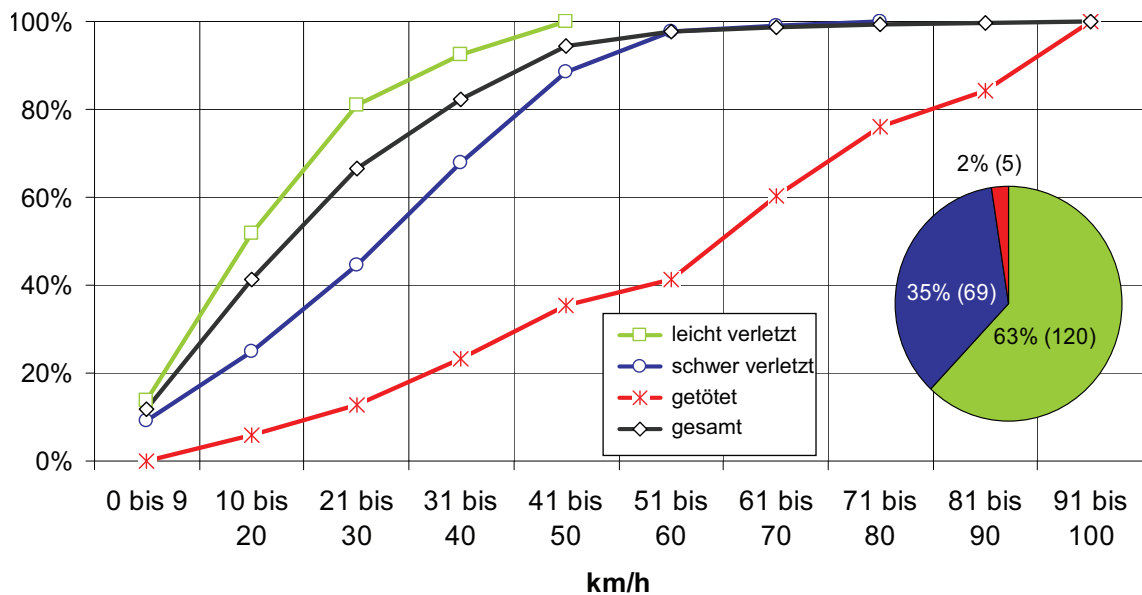


Abbildung 2.1: Kollisionsgeschwindigkeiten bei Fußgänger-Unfällen in kumulierter Darstellung

Die Analyse der Unfalltypen hat ergeben, dass sich 74 % der Unfälle als sogenannte „Überschreiten-Unfälle“ charakterisieren lassen, bei denen das Fahrzeug auf einer annähernd geraden Strecke fährt und der Fußgänger versucht vor dem Fahrzeug die Straße zu überqueren. In Abbildung 2.2 sind zur Veranschaulichung die 15 häufigsten Unfalltypen der 217 untersuchten Unfälle dargestellt (entspricht 173 Unfällen).<sup>6</sup> Die weiteren Unfalltypen verteilen sich auf „Abbiege-Unfälle“ (15 %), Unfälle mit Fußgängern im Längsverkehr<sup>7</sup> (4 %) und sonstige Unfälle (7 %). Abbildung 2.3 zeigt die Verteilung der „Überschreiten-Unfälle“ nach der Richtung, aus der sich der Fußgänger näherte, sowie der Sichtbarkeit für den Fahrer. In etwas mehr als der Hälfte aller Fälle war vor dem Unfall keine Sichtbehinderung für den Fahrer gegeben. Deswegen kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass ein vorausschauendes Fußgängerschutzsystem den Fußgänger erkannt hätte. In den Fällen mit Sichtbehinderung stellt sich (wie in den anderen Fällen auch) die Frage, wann der Fußgänger in den Sichtbereich des Fahrers bzw. der verbauten Sensorik<sup>8</sup> eines Fußgängerschutzsystems eingetreten ist. Dies wird im Folgenden untersucht.

Hierzu wurden 131 Pkw-Fußgänger-Unfälle näher analysiert, bei denen die Unfallrekonstruktionsdaten (Geschwindigkeit der Kollisionsgegner, Annäherungsrichtung, evtl. Verdeckung der Sicht) vollständig vorliegen, sodass eine detaillierte Analyse möglich war. Für jeden Fall wurde die Zeit vor der Kollision (Time to Collision, *TTC*) berechnet, zu der sich der Fußgänger im Sichtfeld einer nach vorne gerichteten Videosensorik befunden hätte. Hierbei wurden für den Öffnungswinkel  $\theta$  des Videosystems drei verschiedene

<sup>6</sup>Die „Überschreiten-Unfälle“ sind zur Verdeutlichung umrandet.

<sup>7</sup>Der Fußgänger bewegte sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung zum Fahrzeug auf der Straße.

<sup>8</sup>Mit Ausnahme eines auf Funk-Kommunikation zwischen Fahrzeug und Fußgänger basierenden Systems.

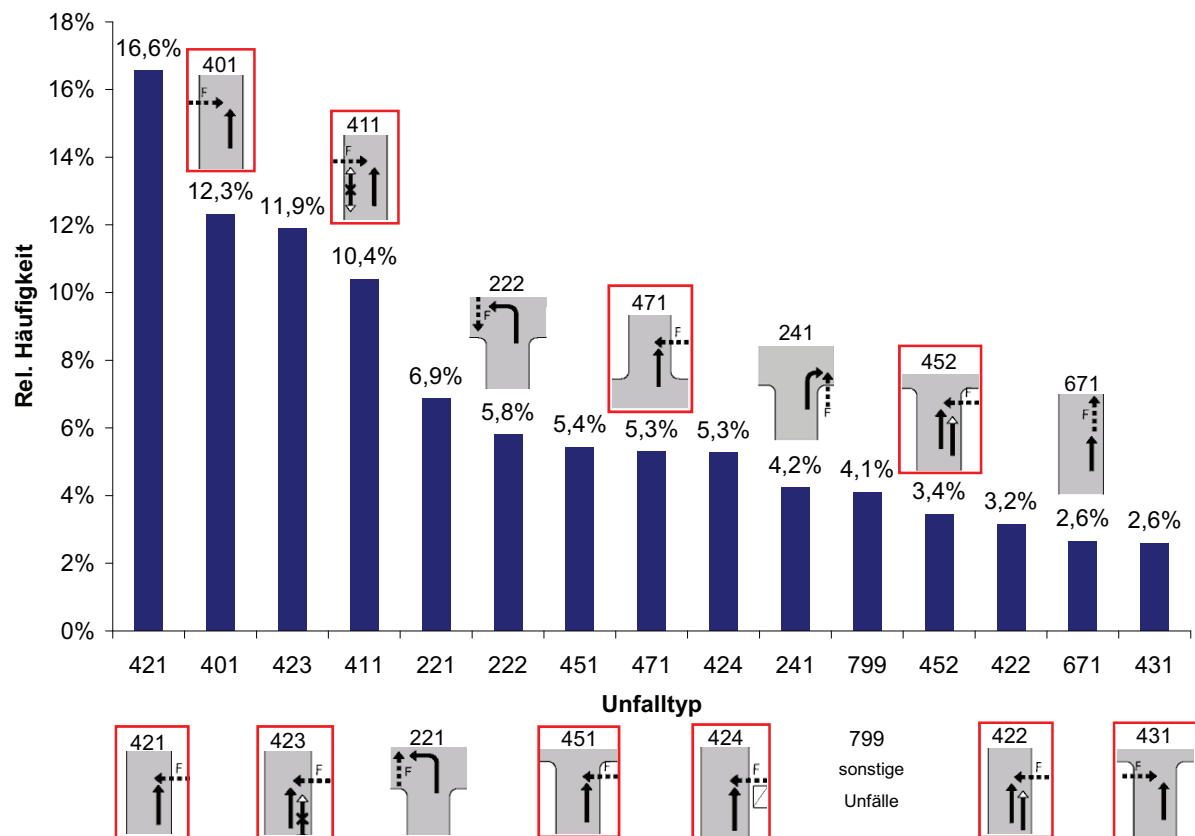


Abbildung 2.2: Die 15 häufigsten Unfalltypen bei Pkw-Fußgänger Frontunfällen

Möglichkeiten berechnet:  $\theta = \pm 11^\circ$ ,  $\theta = \pm 22^\circ$  und  $\theta = \pm 55^\circ$ . Als Einschränkung wurde berücksichtigt, dass ein größerer Öffnungswinkel bei gleicher Auflösung<sup>9</sup> zu geringerer Reichweite führt, da eine Mindestanzahl<sup>10</sup> an Pixel für die Fußgänger-Erkennung benötigt wird. Eine eventuelle Sichtverdeckung für den Fahrer und dementsprechend für den Sensor (beispielsweise ein geparktes Fahrzeug), wurde mithilfe der zur Verfügung stehenden Unfallskizze rekonstruiert und in der Berechnung berücksichtigt. Abbildung 2.4 zeigt die Anteile der Fußgänger, die in Abhängigkeit von der jeweils zur Verfügung stehenden *TTC* und des Winkels sichtbar gewesen wären. Für den Öffnungswinkel von  $\pm 22^\circ$  ist ab einer *TTC* von knapp einer Sekunde der Anteil der sichtbaren Fälle am größten. Im *TTC*-Bereich von 1,5 s bis 1,8 s liegt dieser Anteil bei ca. 70 %.

<sup>9</sup>Es wurde von einer horizontalen Auflösung von 1024 Pixel ausgegangen.

<sup>10</sup>In diesem Fall wurde eine Mindestanzahl von 20 Pixel angenommen.

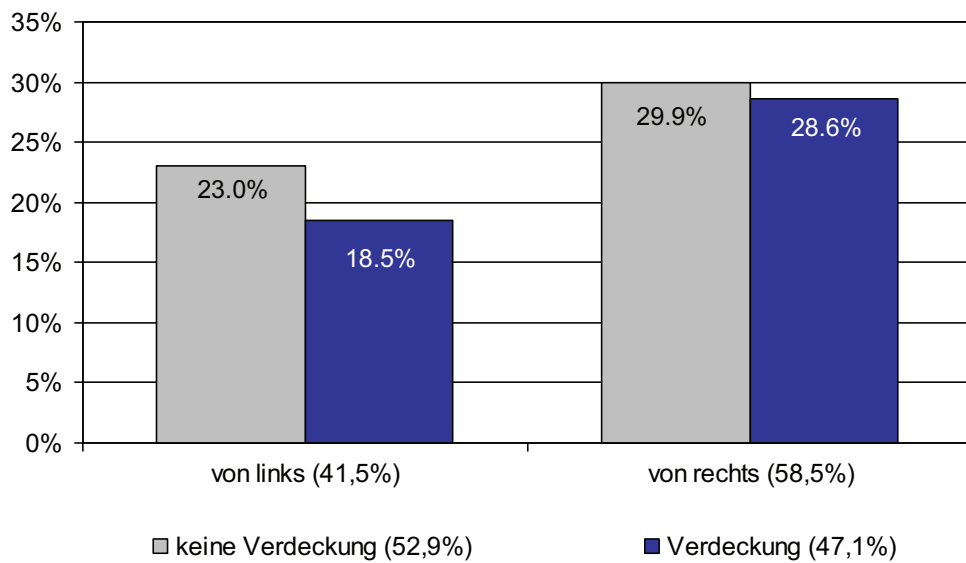


Abbildung 2.3: Überschreiten-Unfälle mit Fußgängern nach Richtung und Sichtverdeckung

## 2.2 Problemanalyse und Maßnahmen im Fußgängerschutz

Die möglichen Maßnahmen zur Verbesserung des Fußgängerschutzes sind vielfältig und einige Systeme befinden sich bereits in heutigen Fahrzeugen (siehe Abschnitt 2.3). Andere, weitergehende Systeme befinden sich vor der Markteinführung bzw. in der Entwicklung.

In diesem Abschnitt werden allgemein die Unterschiede automatischer Funktionen im Fahrzeug im Vergleich mit menschlichen Reaktionen aufgezeigt. Danach wird betrachtet, welche Möglichkeiten und Probleme sich daraus ergeben.

### 2.2.1 Fahrer und System im Vergleich

Eine Reaktion auf eine potenziell gefährliche Situation mit Fußgängern erfordert vom Fahrer wie auch von automatischen Systemen die folgenden Schritte:

#### 1. Wahrnehmung<sup>11</sup>

Die Situation muss zunächst wahrgenommen werden, bevor eine entsprechende Reaktion möglich ist. Für den Fahrer bedeutet dies, dass es ihm möglich ist, die Situation mit seinen Augen zu sehen und im Gehirn zu erfassen. Für ein automatisches System bedeutet es die Notwendigkeit eines umfelderfassenden Sensors, welcher Objekte bzw. Fußgänger erkennen kann.

<sup>11</sup>Für ein automatisches System ist der Begriff *maschinelle Wahrnehmung* gebräuchlich, siehe auch (Stiller 2005).

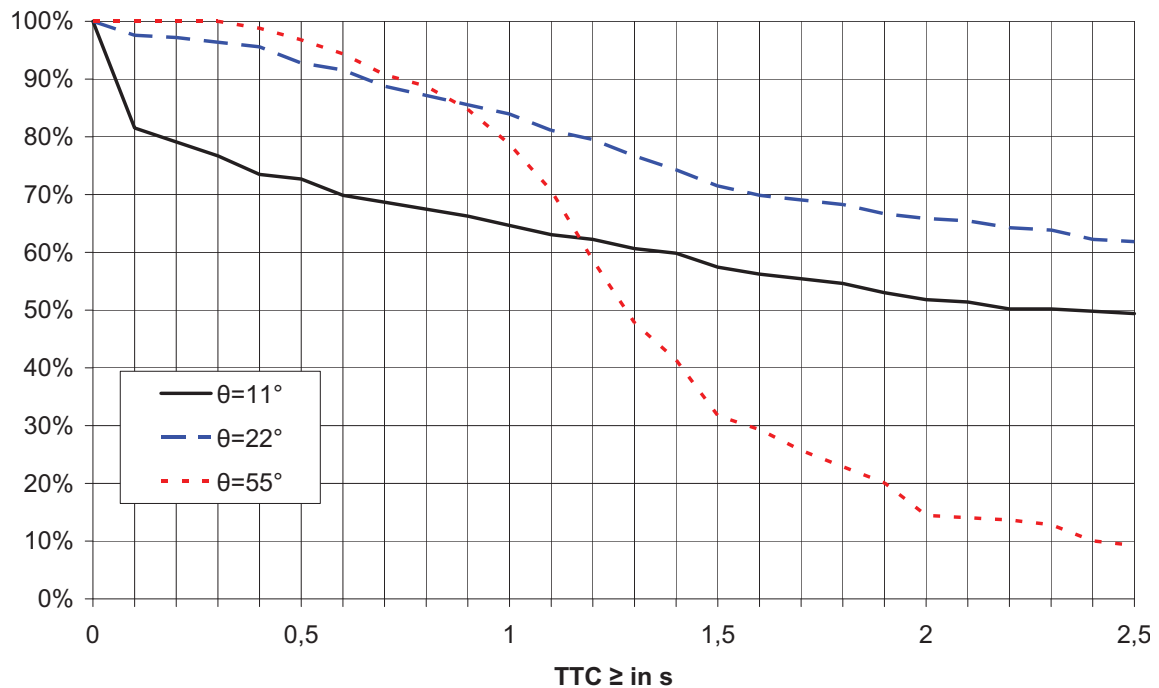


Abbildung 2.4: Anteil der untersuchten Fußgänger-Unfälle im Sichtbereich eines Videosensors mit verschiedenen Öffnungswinkeln in Abhängigkeit der *TTC*

## 2. Interpretation

Die wahrgenommenen Informationen müssen von Mensch oder System verarbeitet und korrekt interpretiert werden, um eine entsprechende Reaktion einzuleiten. Die Datengrundlage für die Interpretation ist dabei jedoch sehr unterschiedlich.

## 3. Reaktion

Nach Interpretation der Situation muss die entsprechende Reaktion des Fahrers bzw. des Systems erfolgen. Diese kann ein plötzliches Bremsmanöver sein oder auch das Ausbleiben einer Reaktion, falls die Situation als ungefährlich eingeschätzt wurde.

Sowohl Fahrer als auch System haben in allen drei Schritten Stärken und Schwächen. Die Wahrnehmung des Fahrers geschieht in erster Linie durch seinen Sehsinn bzw. durch die Verarbeitung der Bilder im Gehirn. Dies ist sehr anschaulich vergleichbar mit einer stereoskopischen<sup>12</sup> Videosensorik mit Bildverarbeitungseinheit. Diese erfasst ebenfalls zwei Bilder und verarbeitet sie weiter, um Objekte aus den Bildern zu extrahieren. Der Vorteil der Videosensorik liegt hier in der konstanten Aufmerksamkeit und der Möglichkeit, tatsächlich Positionen von Objekten zu messen (hier durch Triangulation oder durch andere Messprinzipien bei anderen Sensoren) und nicht nur zu schätzen, wie es der Fahrer tut. Des Weiteren können andere Sensoren auch für den Fahrer nicht sichtbare Objekte wahrnehmen (ein Fußgänger hinter einem geparkten Fahrzeug kann u.U. mittels Radar-

<sup>12</sup>Dies ist nur bis zu einer gewissen Entfernung gültig, Objekte in weiterer Entfernung kann auch der Mensch nur als 'Mono'-Bild verarbeiten

sensorik erkannt werden). Der Fahrer hat hier allerdings den deutlichen Vorteil in der Gesamtheit der Wahrnehmung. Umfeldsensoren können i.A. einzelne Objekte oder auch Fahrspurmarkierungen erkennen, jedoch nicht die Situation in ihrer Gesamtheit.

Dies führt auch zu deutlichen Vorteilen bei der Interpretation, da die Datengrundlage zur Bewertung einer Situation beim Fahrer um ein Vielfaches größer ist. Ein Fahrer trifft die Entscheidung, ob und in welcher Weise er eine Situation als gefährlich einschätzt, aufgrund von sehr vielen Informationen und im Kontext seiner großen individuellen Lernerfahrung. Dazu zählen die Position und auch die Geschwindigkeit eines Fußgängers relativ zum Fahrzeug, aber auch Informationen über die Straße, befahr- und begehbare Flächen, den Zustand der Straße bzw. Wettereinflüsse sowie der wichtigste Punkt, nämlich Informationen über den Fußgänger selbst. Der Fahrer kann zum Beispiel erkennen, ob es sich um eine ältere oder jüngere Person handelt (im Extremfall um ein Kind), was die Mobilität und auch die Berechenbarkeit stark beeinflusst. Der wahrscheinlich wichtigste Punkt hierbei ist, dass der Fahrer (mit Einschränkungen) die Absicht des Fußgängers einschätzen kann. Hierzu werden Umfeld-Informationen (zum Beispiel eine Straßenbahn auf der linken Seite) mit Informationen über den Fußgänger (zum Beispiel ein in Richtung Straßenbahn beschleunigender Fußgänger) verknüpft, um so die Absicht des Fußgängers einzuschätzen (zum Beispiel dass er die Straßenbahn noch schnell erreichen will). Es hat sich gezeigt (Schmidt et al. 2008), dass hierfür die Erkennung der Blickrichtung des Fußgängers entscheidend sein kann. Insbesondere kann die Tatsache, dass der Fußgänger Blickkontakt zum Fahrer aufgenommen hat, bzw. das Ausbleiben eines solchen Blickkontakts, dem Fahrer eine relativ genaue Einschätzung der Absicht des Fußgängers ermöglichen.

Die Datengrundlage eines automatischen Systems im Fahrzeug ist deutlich kleiner. Die Objektinformationen und Attribute wie Position und Geschwindigkeit des erkannten Fußgängers stehen zwar deutlich genauer zur Verfügung, aber keine oder nur wenige Informationen über das weitere Umfeld. Es finden sich zwar bereits erste Ansätze, um beispielsweise die Blickrichtung eines Fußgängers aus dem Videobild zu erkennen (Gandhi und Trivedi 2008), jedoch stehen immer noch zu wenige Informationen zur Verfügung, um beispielsweise die oben beschriebene Verknüpfung des erkannten Fußgängers mit der erkannten Straßenbahn herzustellen.

Das Argument, dass ein Videosensor prinzipiell die gleiche Informationsgrundlage besitzt wie der Fahrer (das Bild der Situation), ist mit Einschränkungen (Auflösung, Winkel, Farbe) zwar korrekt, allerdings ist im Fall des Videosensors nicht die Kamera selbst der Sensor (diese liefert noch keine Informationen über das Umfeld), sondern die Bildverarbeitungs-Algorithmik (entsprechend der Interpretation der Bilder im Gehirn). Hier ist das menschliche Gehirn in den meisten Punkten der Bildverarbeitung deutlich überlegen.



Der Unterschied in der Datengrundlage wird in Abbildung 2.5 noch einmal verdeutlicht. Der Fahrer kann in der Szene erkennen, dass sich hinter dem Fußgänger, welcher am



Abbildung 2.5: Szenensicht des Fahrers und des Systems

Fahrbahnrand steht, ein weiterer Fußgänger, der nicht auf den Verkehr achtet, der Fahrbahn nähert und diese sehr wahrscheinlich überqueren wird. Zusammen mit dem Wissen, dass sich die Szene an einem Zebrastreifen abspielt, ist diese für den Fahrer sehr gut interpretierbar, und er kann vorausschauend reagieren.

Eine maschinelle Umfelderkennung besitzt jedoch auch entscheidende Vorteile gegenüber einem menschlichen Fahrer. Bei Letzterem kann es bekanntermaßen vorkommen, dass er sich nicht immer völlig auf seine Fahraufgabe konzentriert, bzw. durch Nebentätigkeiten nicht aufmerksam genug ist, um eine gefährliche Situation zu erfassen. Des Weiteren sind die Sensordaten, welche die Situationsanalyse verarbeitet um ein vielfaches genauer als die Daten, die der Fahrer verarbeitet. Ein Fahrer kann Entfernungen und Geschwindigkeiten deutlich schlechter einschätzen als die Sensorik sie messen kann. Mit diesen Daten kann die Situationsanalyse einen potenziellen Kollisionszeitpunkt genauer bestimmen als der Mensch. Darüber hinaus besitzen automatische Systeme einen großen Vorteil im dritten Schritt, der Reaktion. Die Geschwindigkeit, mit der eine getroffene Entscheidung in eine Handlung umgesetzt werden kann, ist deutlich höher als beim Fahrer, was im Fall einer kritischen Situation wertvolle Zeit verschaffen kann.

### 2.2.2 Ideale Systeme

Die im vorigen Abschnitt genannten Nachteile der maschinellen Wahrnehmung sind Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten (siehe zum Beispiel Gandhi und Trivedi 2008 zur Erkennung der Blickrichtung eines Fußgängers). Des Weiteren schreitet die Entwicklung von Umfoldsensoren stetig voran, sodass in Zukunft einige der genannten Nachteile gegenstandslos sein könnten. Da diese hauptsächlich aus der mangelnden Gesamtwahrnehmung und der dadurch schlechteren Grundlage zur Situationsinterpretation bestehen, stellt sich die Frage, wie ein System mittels eines „idealen Sensors“ arbeiten könnte. Dieser ideale Sensor könnte Informationen über den Kontext einer erkannten Situation liefern und

so eine erweiterte Situationsanalyse ermöglichen. Die bereits genannten Vorteile eines automatischen Systems, die schnelle Reaktion, die genaue Ortung von Fußgängern und die nie nachlassende Aufmerksamkeit könnten dadurch in vielen Situationen zur Geltung kommen, in denen heutige Systeme aufgrund von Unsicherheiten nicht reagieren können.

Ein Beispiel für eine solche weitergehende Analyse könnte die typische Szene des zwischen geparkten Fahrzeugen auf die Straße rollenden Balls sein, dem häufig ein Kind folgt, um den Ball zu holen. Falls eine solche Situation erkennbar wäre, könnte beispielsweise die Bremse vorgespannt werden, sodass bei der Erkennung des Kindes sofort die optimale Bremskraft zur Verfügung stünde. Auch die Analyse der in Abbildung 2.5 gezeigten Szene ließe sich durch erweiterte Kenntnisse des Umfelds verbessern. Eine Zebrastreifenerkennung, wie sie in (Darms et al. 2009) beschrieben wird, wäre hierfür beispielsweise ein erster Schritt.

Selbstverständlich wären auch ideale Systeme gewissen Prädiktionsunsicherheiten unterworfen, welche sich nicht durch die Verbesserung der Sensorik oder der Interpretation auflösen lassen. Ein Fußgänger, der ruhig am Fahrbahnrand steht und sich plötzlich entscheidet die Straße zu überqueren, kann erst in dem Moment als gefährdet eingestuft werden, in dem die Bewegung erkannt wird. Ein ideales System könnte dieses zwar schneller feststellen als der Fahrer, aber ebenfalls erst zum Zeitpunkt der Bewegung. Hier können natürlich Kontextinformationen helfen, sie werden jedoch niemals eine ausschließlich korrekte Prädiktion ermöglichen.

Im folgenden Abschnitt wird vorgestellt, welche Systeme bereits unter heutigen technischen Randbedingungen zur Verbesserung der Fußgängersicherheit beitragen bzw. sich in der Entwicklung befinden, bevor im weiteren Verlauf der Arbeit die Situationsanalyse für ein spezielles System entwickelt wird.

## 2.3 Vorhandene Fußgängerschutzmaßnahmen

Die bekanntesten fahrzeugseitigen Maßnahmen zum Fußgängerschutz sind die passiven Strukturmaßnahmen am Fahrzeug selbst (siehe Abschnitt 2.3.1). Mit Einführung der EU-Richtlinie 2003/102/EG und dem Inkrafttreten der ersten Phase im Jahr 2005 wurden verschiedene Grenzwerte für Kenngrößen im Crash-Test mit Bein- und Kopfprüfkörpern erlassen. Es wurde unter anderem ein Grenzwert für den HPC-Wert (Head Performance Criterion) festgelegt, welcher die Kopfbelastung, „ausgedrückt als die beim Aufprall während einer bestimmten Zeitspanne auftretende größte Kopfbeschleunigung“ beschreiben soll. Diese Richtlinie wurde im Jahr 2009 durch die Verordnung (EG) Nr.78/2009 ersetzt, da die Bedingungen der zweiten Phase der Richtlinie von 2003 teilweise als nicht sinnvoll angesehen wurden. Um dennoch ein höheres Sicherheitsniveau für ungeschütz-



Abbildung 2.6: Illustration einer aktiven Motorhaube, Quelle: Bosch

te Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten, wurde die verpflichtende Ausstattung von neuen Fahrzeugmodellen (ab November 2009) bzw. von Neufahrzeugen (ab November 2011) mit einem Bremsassistenten (siehe Abschnitt 2.3.3) beschlossen. Des Weiteren wurde zusätzlich die Möglichkeit eingeräumt, die Bestimmungen der Verordnungen nicht erfüllen zu müssen, falls das Fahrzeug mit Kollisionsvermeidungssystemen ausgerüstet ist, die sich nach einer zu definierenden Bewertung<sup>13</sup> als ebenso wirksam erwiesen haben.

### 2.3.1 Passive Maßnahmen

Die Anforderungen an die passive Sicherheit betreffen das Frontend des Fahrzeugs (d. h. den Stoßfänger, Haubenvorderkante, Scheinwerfer), die Fronthaube sowie den Frontscheibenbereich (inklusive A-Säule und Dachrahmen). Bei der Entwicklung all dieser Bauteile und beim Design des gesamten Vorderwagens gehen Aspekte der Fußgängersicherheit mit ein. Für eine Übersicht über die verschiedenen Maßnahmen in diesem Bereich siehe (Kühn et al. 2007, Kapitel 3).

Des Weiteren zählen auch aktive Strukturmaßnahmen zu den passiven Maßnahmen, da diese zwar aktiv ausgelöst werden, jedoch erst zum Einsatz kommen, wenn der Kontakt bei der Kollision bereits besteht. Zu diesen Maßnahmen zählt die aktive Motorhaube, welche bei einer festgestellten Kollision des Fußgängers mit der Fahrzeugfront (zum Beispiel durch Kontaktsensorik) aktiv aufgestellt wird, um so den Deformationsweg zu vergrößern und die auftretenden Kräfte beim Aufprall des Kopfes auf die Haube zu minimieren. Das Aufstellen der Haube kann hierbei reversibel (zum Beispiel elektromechanisch, pneumatisch) oder irreversibel (zum Beispiel pyrotechnisch) geschehen. Eine Illustration einer aktiven Motorhaube findet sich in Abbildung 2.6. Der Einsatz aktiver Hauben ist bereits serienmäßig in einigen Fahrzeugen verfügbar. Zum ersten Mal kam ein solches System

<sup>13</sup>Zum Stand der Fertigstellung dieser Arbeit existiert noch kein bekanntes einheitliches Verfahren.

im Honda Legend 2004 zum Einsatz. Für den Aufbau eines solchen Systems und nähere Details siehe (Kühn et al. 2007 und Inomata et al. 2009). Weitere noch experimentelle aktive Strukturmaßnahmen stellen zum Beispiel Außenairbags dar (McCarthy und Simmons 2005), die bei einer Kollision im Bereich der vorderen Windschutzscheibe den Anprall des Fußgängers abmildern sollen.

### **2.3.2 Maßnahmen zur Wahrnehmungsverbesserung**

Wahrnehmungsverbesserung bedeutet eine Hilfe für den Fahrer, das Umfeld des Fahrzeugs besser zu erkennen und ihn evtl. auch auf mögliche Gefährdungen hinzuweisen. Im Bereich des Fußgängerschutzes gibt es seit einigen Jahren Systeme, die die Sicht bei Nacht verbessern sollen, sogenannte Nachtsicht-Assistenten. Es kommen hierbei hauptsächlich zwei Technologien zum Einsatz, aktive und passive Nachtsicht-Assistenten. Bei aktiven Assistenten sind zusätzliche Infrarotscheinwerfer im Fahrzeug integriert sowie eine Kamera, die die zurückgestreute Infrarotstrahlung aufnimmt. Hierbei kommt die sogenannte Nah-Infrarotstrahlung zum Einsatz. Passive Systeme verzichten auf zusätzliche Einbauten im Scheinwerfer, eine Kamera empfängt hier die Wärmestrahlung im Fern-Infrarotbereich und kann so alle Wärme emittierenden Objekte im Umfeld anzeigen. Für Details zu den unterschiedlichen Technologien sowie eine Möglichkeit der Fusion beider Systeme siehe (Jahard et al. 1997).

Die erste Generation solcher Systeme (beginnend mit dem im Cadillac DeVille verfügbaren System im Jahr 2000) zeigte dem Fahrer lediglich ein Bild der Szene vor ihm und überließ die Interpretation dem Fahrer. In Systemen der zweiten Generation (Honda Intelligent Night Vision (2004), BMW Nightvision2 (2008), Daimler Nightview+ (2009)) werden zusätzlich die Bildinformationen verarbeitet, um Fußgänger im Bild gezielt zu erkennen und für den Fahrer sichtbar zu machen (Kozyreff 2008). Abbildung 2.7 zeigt ein Beispiel einer Darstellung des Nachtsicht-Assistenten von Daimler.

### **2.3.3 Aktive, vorausschauende Sicherheitssysteme**

Aktive Systeme nutzen, ähnlich wie Systeme zur Wahrnehmungsverbesserung, Umfellsensoren, um die Situation rund um das Fahrzeug beobachten und interpretieren zu können. Wird eine potenziell gefährliche Situation erkannt, können verschiedene Aktorik- und/oder Warnkonzepte initiiert werden. Eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten in diesem Bereich findet sich in Abbildung 2.8. Systeme zur Kollisionsfolgenminderung nach erfolgtem Kontakt sind die bereits in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen aktiven Motorhauben. Weitere mindernde oder vermeidende Systeme können bereits vor der Kollision



Abbildung 2.7: Illustration des Nachtsicht-Assistenten von Daimler, Quelle: Daimler

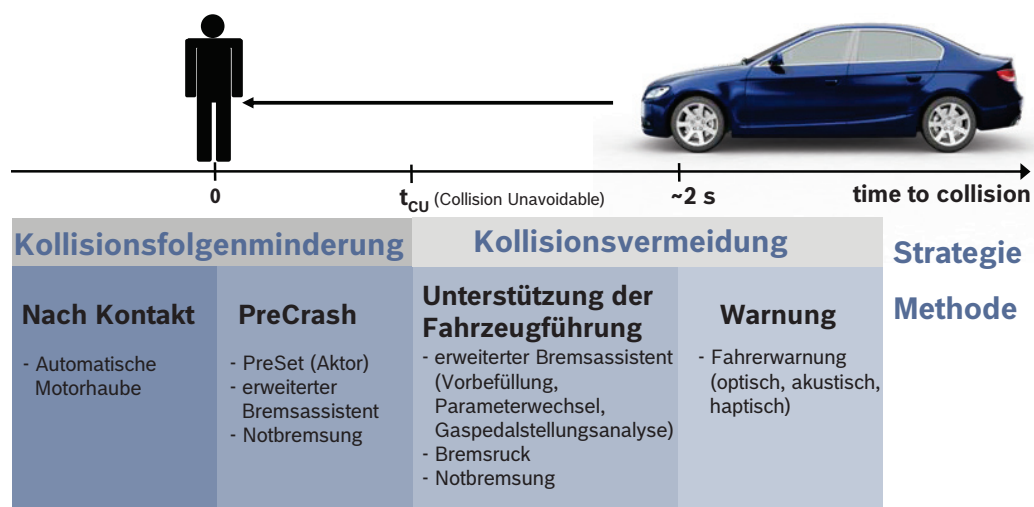


Abbildung 2.8: Möglichkeiten des Fußgängerschutzes, Quelle: Bosch

aktiviert werden, falls durch die Umfeldsensorik festgestellt werden kann, dass eine hohe Kollisionsgefahr besteht. Dabei sind Folgende zu nennen:

- **PreSet:** Im Fall der festgestellten Unvermeidbarkeit einer Kollision können die Aktoren einer aktiven Motorhaube vorbereitet werden, um die Aufstellzeit zu verkürzen.<sup>14</sup>
- **Bremsassistent:** Der Einsatz eines Bremsassistenten, welcher verpflichtend für Neufahrzeuge eingeführt wird, zielt zwar nicht direkt auf die Vermeidung oder Verminderung von Unfällen mit Fußgängerbeteiligung ab, kann aber bei diesen Unfällen eine deutlich positive Wirkung zeigen (Fröming et al. 2006; Barrios et al. 2009). Mittels eines Bremsassistenten kann eine vom Fahrer gewünschte Notbremsung unterstützt werden, indem bei einem erkannten (in erster Linie über die Bremspedalge-

<sup>14</sup>Eine Übersicht über Möglichkeiten im PreCrash-Bereich den Insassenschutz betreffend, findet sich beispielsweise in (Sohnke 2010)

schwindigkeit) Notbremswunsch zusätzliche Bremskraftunterstützung geliefert wird (Winner 2009).

Wurde durch die Umfeldsensorik eine potenziell gefährliche Situation erkannt, können die Schwellen für die Auslösung des Bremsassistenten herabgesetzt werden, um so dem Fahrer eine leichtere Auslösung zu ermöglichen. Ebenfalls möglich ist die Einbeziehung der Umsetzzeit zwischen dem Loslassen des Gaspedals und dem Betätigen der Bremse. Falls der Fahrer das Gaspedal sehr schnell löst und daraufhin das Bremspedal berührt, ist ein Notbremswunsch in Verbindung mit der sensierten Gefahr sehr wahrscheinlich.

- Notbremsung: Die wirksamste Methode (Fröming et al. 2006; Barrios et al. 2009), zur Verminderung der Kollisionsfolgen stellt die automatische Notbremsung dar. Ein Eingriff des Fahrers ist im Gegensatz zum Bremsassistenten nicht notwendig, sodass wertvolle Zeit gewonnen werden kann. Falls die Unvermeidbarkeit einer Kollision festgestellt wurde, kann ein solches System durch automatische Verzögerung des Fahrzeugs das Verletzungsrisiko des Fußgängers stark reduzieren. Da schon im Vorfeld der Unvermeidbarkeit eine gefährliche Situation erkannt werden kann, kann bereits vor dem eigentlichen Eingriff die Bremse vorgespannt werden, sodass im Moment der automatischen Verzögerung sofort die optimale Bremskraft zur Verfügung steht.
- Bremsruck: Als Bremsruck wird eine sehr kurze, automatische Verzögerung des Fahrzeugs bezeichnet, welche eine warnende Wirkung auf den Fahrer haben soll und bereits einen geringen Teil der Kollisionsgeschwindigkeit reduziert. In (Winner 2009) wird ein beispielhafter Bremsruck beschrieben, der „mit einer typischen Verzögerungsamplitude [von]  $4 \text{ m/s}^2$ , Auf- und Abbaufankendauern von  $0,2 \text{ s}$  und einer Dauer von typisch  $0,3 \text{ s}$ “ einen Geschwindigkeitsabbau von etwa  $2 \text{ m/s}$  bewirkt. Studien haben gezeigt, dass ein solcher Bremsruck eine effektive Methode zur Fahrerwarnung darstellt (Färber und Maurer 2005; Knoll und Schäfer 2005).
- Warnung: Zur Fahrerwarnung gehören neben dem beschriebenen Bremsruck auch die Maßnahmen zur Wahrnehmungsverbesserung (Abschnitt 2.3.2). Darüber hinaus kann eine Fahrerwarnstrategie weitere optische und/oder akustische Elemente enthalten. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Fahrerwarnsystem wird in der Folge noch näher erläutert. Das dabei eingesetzte Human-Machine-Interface (HMI), welches den Fahrer auf eine gefährliche Situation aufmerksam machen soll, wird in Kapitel 7 beschrieben.

Systeme zur Kollisionsvermeidung bzw. Kollisionsfolgenminderung im Längsverkehr (d. h. Kollisionen zwischen zwei Fahrzeugen) wurden ausgehend vom Abstandsregelautomat (Adaptive Cruise Control, ACC) in den letzten Jahren bereits in den Markt eingeführt.



Diese Systeme beinhalten eine oder auch mehrere der oben beschriebenen Komponenten. Als Beispiele seien genannt:

- Lexus LS (2003): Pre-Collision-System
- Honda Inspire (2003): Collision Mitigation Brake System
- Mercedes-Benz S-Klasse (2006): Pre-Safe-Brake
- Volvo S80 (2007) Collision Warning with Auto Brake
- Audi A8 (2010): Pre-Sense-Plus

Hinsichtlich der Sicherheit für ungeschützte Verkehrsteilnehmer waren solche Systeme mit Ausnahme des Bremsassistenten und einem weiterentwickelten Volvo-System zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht eingeführt. Die hohe Aktualität des Themas lässt sich auch daran erkennen, dass das im Volvo S60 eingeführte System „Collision Warning with Full Autobrake and Pedestrian Protection“ während der Entstehungszeit dieser Arbeit zum Ende des Jahres 2010 auf den Markt kam. Das System soll laut Spezifikation Kollisionen mit Fußgängern bis zu einer Geschwindigkeit von 35 km/h vermeiden können. Nähere technische Informationen über das System sind bisher allerdings nicht verfügbar.

In den letzten Jahren wurden darüber hinaus einige Forschungsprojekte durchgeführt, welche sich mit der Realisierbarkeit solcher Systeme beschäftigen. Viele Forschungsinitiativen wurden dabei von der EU oder auch vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert. In der Folge werden einige dieser Projekte vorgestellt.

- SAVE-U (Sensors and system architecture for vulnerable road users protection): Das Projekt wurde 2005 abgeschlossen und zielte in erster Linie auf die Erkennung von Fußgängern mittels Video- und Radarsensorik ab (Save-U 2011).
- WATCH-OVER (Vehicle-to-vulnerable road user cooperative Communication and sensing Technologies to improve transport Safety) wurde 2008 beendet und beschäftigte sich mit kooperativen Technologien (Kommunikation zwischen Fußgänger und Fahrzeug mittels WLAN und RFID) zur Erkennung von gefährliche Situationen (Watchover 2011).
- SCOVA (Cooperative systems applications vehicle based) als Teilprojekt von SAFESPOT (Cooperative vehicles and road infrastructure for road safety) beschäftigte sich ebenfalls mit der Kommunikation von Fahrzeugen und Fußgängern, hier lag der Hauptfokus allerdings nicht nur auf Unfallsituationen mit Fußgängern (Safespot 2011).
- PROPEDES (Predictive pedestrian protection at Night) beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung der bereits erwähnten Nachtsicht-Assistenten mittels Hinzunahme von Radarsensorik (Propedes 2011).

- INVENT (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik):  
Hier lag der Fokus allgemein auf vorausschauender aktiver Sicherheit, im Rahmen des Teilprojekts VAS beschäftigte sich aber auch ein Projektpartner mit neuartigen Konzepten für aktive Motorhauben (Invent 2011).
- AKTIV (Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr):  
Im Teilprojekt AKTIV-SFR (Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer) wurden von den Projektpartnern verschiedene vorausschauende Systeme entwickelt, welche mit unterschiedlicher Sensorik Fußgänger erkennen und unterschiedliche Konzepte zur Kollisionsvermeidung und Folgenminderung verfolgen (Aktiv 2011). Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit sind direkt in den Beitrag der Robert Bosch GmbH zum AKTIV-SFR eingeflossen (Branz et al. 2011).

## 2.4 Anforderungen an eine vorausschauende Fußgängerschutz-Funktion

In diesem Abschnitt werden die allgemeinen Anforderungen an ein vorausschauendes Fußgängerschutzsystem hergeleitet und beschrieben. Da die Anforderungen von der jeweiligen Ausprägung der Funktion abhängen und in dieser Arbeit ein Ansatz vorgestellt wird, der die Ausprägung als Warnfunktion, aber auch als Notbremsfunktion vorsehen kann, werden beide Ausprägungen behandelt.

Die Anforderungen werden in diesem Abschnitt in drei Kategorien eingeteilt, wobei eine wirksame Funktion die Anforderungen aus allen Kategorien erfüllen muss. Die Kategorien sind im Einzelnen:

### 1. Rechtzeitigkeit

Die Forderung nach der Rechtzeitigkeit einer Funktion bedeutet, dass die Funktion spätestens zu einer Zeit  $t_{min}$  aktiv werden muss, um noch einen Mindestnutzen zu erzeugen.

### 2. Wahrnehmbarkeit

Im Falle einer Ausprägung als Fahrer-Warnfunktion muss der Fahrer in der Lage sein, die Warnung als solche zu erkennen, um entweder kognitiv oder intuitiv darauf reagieren zu können. Im Fall einer Notbremsfunktion entfällt diese Anforderung, da der Fahrer nicht selbst reagieren muss.

### 3. Adäquatheit

Bei einer Fahrer-Warnfunktion muss der Fahrer die ausgegebene Warnung als subjektiv angemessen empfinden. D. h., es muss ein objektives Maß gefunden werden, um in der Warnstrategie zu entscheiden, ob eine Situation als kritisch eingeschätzt



wird oder nicht. Insbesondere sollten keine Warnungen auf *False Positive*-Objekte (FP, fälschlicherweise als Fußgänger klassifizierte Objekte) ausgegeben werden, da diese Fehlwarnungen den Fahrer im schlimmsten Fall von der Fahraufgabe ablenken und selbst im besten Fall als störend empfunden werden. Falls es (aus der Sicht des Fahrers) zu unnötigen Warnungen kommt, wird dieser vermutlich (je nach Häufigkeit der Fehlwarnungen) weitere (gerechtfertigte) Warnungen ignorieren oder das System deaktivieren.

Im Fall der Notbremsfunktion ist die Forderung nach der Adäquatheit entscheidend, da eine Auslösung immer mit dem objektiven Risiko eines Auffahrunfalls verbunden ist.<sup>15</sup> Insbesondere Auslösungen auf FP-Objekte würden vom Fahrer nicht toleriert, selbst wenn es nicht zu einem Folgeunfall käme.

Im Folgenden werden die drei Anforderungen für die Ausprägungen Fahrer-Warnfunktion und Notbremsfunktion untersucht und entsprechende Untergrenzen bzw. Mindestanforderungen festgelegt. Anschließend wird auf die daraus resultierenden allgemeinen Anforderungen an eine umfelderfassende Sensorik eingegangen.

## 2.4.1 Anforderungen an eine Fahrer-Warnfunktion

### Rechtzeitigkeit

Die Anforderung der Rechtzeitigkeit besagt hier, dass die Warnung an den Fahrer rechtzeitig vor einer potenziellen Kollision ausgegeben werden muss, sodass dieser noch selbstständig reagieren kann und im besten Fall die Kollision vermeidet. Dieser beste Fall kann jedoch nicht die Mindestanforderung definieren, da auch im Fall einer Bremsreaktion mit Geschwindigkeitsabbau, welche nicht zur Vermeidung führt, deutlicher Nutzen entsteht (siehe beispielsweise Rosén und Sander 2009).

Hieraus ergibt sich die Minimalforderung an die Warnzeit  $t_w$  vor einer möglichen Kollision durch

$$t_w \geq t_r + t_s + t_b. \quad (2.1)$$

Hier sind

$t_r$ : Reaktionszeit des Fahrers,

$t_s$ : Totzeit des Bremssystems,

$t_b$ : Zeit vor der potenziellen Kollision, bei der die Bremsung beginnt.

Da in diesem Abschnitt Mindestanforderungen abgeleitet werden sollen, ab der eine Warnfunktion sinnvoll sein kann, wird in der Folge von einer unteren Grenze für die Reaktions-

---

<sup>15</sup>Eine Auslösung muss an fahrphysikalische Randbedingungen gekoppelt sein.

zeit  $t_r$  von  $t_{r,u} = 0,8\text{ s}$  ausgegangen. Dies entspricht etwa dem durchschnittlichen Wert ohne Blickzuwendungszeit (die Zeit, welche der Fahrer benötigt, um seinen Blick auf die Gefahr zu richten, vgl. Burckhardt 1991 und Bäumler 2007a, b, 2008). Unter Berücksichtigung einer Blickzuwendungszeit von ca.  $0,5\text{ s}$  ergäbe sich eine neue untere Grenze  $t_{r,u}^+ = 1,3\text{ s}$ . Im Folgenden wird zunächst die Mindestanforderung unter Berücksichtigung von  $t_{r,u}$  hergeleitet und anschließend die Verwendung von  $t_{r,u}^+$  diskutiert.

Die Totzeit des Bremssystems  $t_s$  sei mit  $t_{s,u} = 0,2\text{ s}$  angenommen. Im Allgemeinen kann diese Zeit deutlich höher liegen. Ausgehend von einer durch den Bremsassistenten unterstützten Bremsung (bei der die Totzeit deutlich minimiert werden kann), kann diese Annahme jedoch als gerechtfertigt angesehen werden.

Für die zu Beginn der Bremsung verfügbare Zeit ergibt sich die Forderung  $t_b > 0$ , da nur dann die Kollisionsgeschwindigkeit tatsächlich reduziert werden kann.

Insgesamt ergibt sich damit aus (2.1)

$$t_w > 1\text{ s}. \quad (2.2)$$

Unterhalb dieser Zeit wird eine Warnung an den Fahrer nur in den seltensten Fällen einen Effekt zeigen.

Im Bereich einer Warnzeit von  $t_w \approx 1\text{ s}$  ist der Nutzen noch gering, da mit den obigen Annahmen an die Reaktions- und Totzeit das Fahrzeug erst nach einer Sekunde ( $t_{r,u} + t_s$ ) zu bremsen beginnt. Daher werden zusätzlich die Mindestanforderungen an eine potenziell kollisionsvermeidende Fahrer-Warnfunktion aufgestellt. Aus Abschnitt 2.1 ist bekannt, dass ca. 90 % der adressierten Fußgänger-Unfälle bei Kollisionsgeschwindigkeiten unterhalb von  $50\text{ km/h}$  stattfinden, ca. 70 % bis  $40\text{ km/h}$  und ca. 55 % bis  $30\text{ km/h}$ .

In der Tabelle 2.1 finden sich die Zeiten  $t_b$ , die benötigt werden, um einen Unfall aus verschiedenen Geschwindigkeiten noch zu vermeiden. Zu beachten ist, dass  $t_b$  dabei nicht die tatsächliche Bremszeit, sondern die *TTC*, ab der die Bremsung erfolgen muss, bezeichnet.<sup>16</sup> Die Werte wurden mit einer Bremsverzögerung von  $a_{brake} = 5\text{ m/s}^2$  (geübter Fahrer ohne zusätzliche Unterstützung), sowie mit der theoretisch maximalen Verzögerung von  $a_{brake} = 9,81\text{ m/s}^2$  berechnet. Die maximale Bremsverzögerung kann über einen umparametrierten Bremsassistenten erreicht werden. Diese Umparametrierung bzw. Vorspannung der Bremse kann in der Zeit nach Ausgabe der Warnung bis zum Eingriff des Fahrers erfolgen.

Aus Tabelle 2.1 ergeben sich zusammen mit (2.2) zur Unfallvermeidung aus den verschiedenen Geschwindigkeiten die in Tabelle 2.2 aufgeführten Warnzeiten  $t_w$ . Das bedeutet, dass beim Einsatz eines Bremsassistenten, also bei einer vom Fahrer initiierten, automa-

---

<sup>16</sup>Die tatsächliche Bremszeit ist länger, da mit Beginn der Bremsung die *TTC* wächst

tischen Vollverzögerung, bereits bei einer Warnzeit von  $t_w \geq 1,7 \text{ s}$  ca. 90 % aller betrachteten Fußgänger-Unfälle verhindert werden könnten. Der gleiche Wirkgrad ergibt sich für den geübten Fahrer ohne Bremsassistent bei  $t_w \geq 2,4 \text{ s}$ .

Unter Berücksichtigung der Blickzuwendungszeit und der damit verbundenen Reaktionszeit  $t_{r,u}^+$ , erhöhen sich diese Werte entsprechend um 0,5 s. Da an dieser Stelle Mindestanforderungen definiert werden sollen und je nach Warnstrategie (vgl. nächster Abschnitt) der Fahrer intuitiv auf die Warnung reagieren könnte (ohne den Blick tatsächlich auf den Fußgänger zu richten), wird in der Folge von den Ergebnissen für  $t_{r,u} = 0,8 \text{ s}$  ausgegangen.

Es bleibt festzuhalten, dass die Mindestanforderung an die Warnzeit  $t_w > 1 \text{ s}$  beträgt, zur Unfallvermeidung in den adressierten Fällen jedoch nach Möglichkeit  $t_w > 1,7 \text{ s}$  erfüllt sein sollte. Dies ist aus zwei Gründen jedoch nicht in allen Fällen möglich. Eine Einschränkung wird sich in der Folge durch die eingesetzte Sensorik ergeben, die nicht in allen Fällen den Fußgänger rechtzeitig erkennen kann. Die andere Einschränkung liegt in den Unfallszenen selbst, da es Fälle geben kann, in denen ein Fußgänger erst unterhalb von einer  $TTC \approx 1,7 \text{ s}$  in eine gefährliche Situation eintritt. In einem solchen Fall ist eine Warnung vorher unangebracht (siehe auch nächster Abschnitt).

## Wahrnehmbarkeit

Damit durch eine Warnfunktion Wirkung erzielt wird, muss der Fahrer die ausgegebene Warnung wahrnehmen und auch richtig interpretieren können. Hierfür bedarf es einer Warnstrategie, die den Fahrer möglichst schnell und intuitiv auf die bevorstehende Gefahr aufmerksam macht. Die Anforderung der Wahrnehmbarkeit lässt sich nicht direkt quantifizieren, jedoch indirekt über die Reaktionszeit messen. Die gewählte Warnstrategie wird in Abschnitt 7.1 näher beschrieben.

## Adäquatheit

Der entscheidende Punkt für ein erfolgreiches Fußgängerkollisionswarnsystem ist die Adäquatheit der Warnung. Dies bedeutet, dass eine Warnung nur dann ausgegeben werden

$v_{ego}$ in km/h	$a_{brake} = 5 \text{ m/s}^2$		$a_{brake} = 9,81 \text{ m/s}^2$	
	$t_b$ in s	Bremsweg in m	$t_b$ in s	Bremsweg in m
50	1,4	19,3	0,7	9,8
40	1,1	12,4	0,6	6,3
30	0,8	6,9	0,4	3,5
20	0,6	3,1	0,3	1,6
10	0,3	0,8	0,1	0,4

Tabelle 2.1: Zeiten  $t_b$  zur Kollisionsvermeidung

$v_{ego}$ in km/h	$a_{brake} = 5 \text{ m/s}^2$	$a_{brake} = 9,81 \text{ m/s}^2$	Anteil Unfälle ca.
	$t_w \geq$ in s	$t_w \geq$ in s	
50	2,4	1,7	90%
40	2,1	1,6	70%
30	1,8	1,4	55%
20	1,6	1,3	35%
10	1,3	1,1	25%

Tabelle 2.2: Zeiten  $t_w$  zur Kollisionsvermeidung

darf, wenn tatsächlich eine als kritisch empfundene Situation mit Fußgängerbeteiligung vorliegt. Dies ist ein subjektives Kriterium und kann sich von Fahrer zu Fahrer unterscheiden. Die Adäquatheit der Warnung ist das entscheidende Kriterium, da ein System, das Warnungen ausgibt, welche vom Fahrer nicht als gerechtfertigt empfunden werden, auf Dauer vom Fahrer nicht akzeptiert bzw. ignoriert wird. Hierbei kommt es insbesondere darauf an, wie häufig eine Fehlwarnung (aus Sicht des Fahrers) ausgegeben wird.

Das Kriterium Adäquatheit läuft entgegengesetzt dem Kriterium der Rechtzeitigkeit, da Fehlwarnungen komplett vermieden werden können, wenn die Warnzeit  $t_w$  nur klein genug gewählt wird. Daher muss zwischen diesen beiden Kriterien eine Balance gefunden werden, sodass die Funktion Nutzen stiftet, Fehlwarnungen jedoch so selten vorkommen, dass das System noch akzeptiert wird. Falls diese beiden Kriterien nicht zusammen erfüllt werden können, würde vom System kein Nutzen generiert werden.

Es ergeben sich hieraus zwei entscheidende Fragestellungen:

- (i) Wie oft darf eine Fehlwarnung des Systems vorkommen, sodass es vom Fahrer nicht als störend empfunden wird, bzw. der Fahrer das System nicht ignoriert oder abschaltet?
- (ii) Wie kann die Kritikalität einer Situation gemessen werden, d. h. wann ist eine Situation mit einem Fußgänger wirklich kritisch?

Die Frage (i) wird hier beleuchtet, während Frage (ii) in Kapitel 3 beantwortet wird, da es hierbei nicht direkt um die Anforderungen an eine Fußgängerschutzfunktion geht.

Eine Fehlwarnrate  $FWR = 0,1 \text{ h}^{-1}$  führt unter der Annahme, dass sich ein Fahrer im Durchschnitt eine halbe Stunde pro Tag im Stadtverkehr bewegt (hier können relevante Szenarien mit Fußgängern hauptsächlich auftreten), alle 20 Tage zu einer Fehlwarnung. Dies könnte jedoch zur Folge haben, dass ein Gewöhnungsprozess stattfindet, der Fahrer sich also an die Fehlwarnungen gewöhnt und auf eine „echte“ Warnung zunächst nicht reagiert.

Um einen solchen Gewöhnungsprozess zu verhindern, müsste  $FWR$  weiter reduziert werden, d. h.  $FWR < 0,1 \text{ h}^{-1}$  eingehalten werden. Im Fall  $FWR \approx 0,01 \text{ h}^{-1}$  wäre eine

Fehlwarnung alle 200 Tage zu erwarten und ein Gewöhnungsprozess würde vermutlich nicht stattfinden.<sup>17</sup> Die Anforderung an die Fehlwarnrate ergibt sich demnach zu

$$10^{-2} \text{ h}^{-1} \leq FWR < 10^{-1} \text{ h}^{-1}. \quad (2.3)$$

## 2.4.2 Anforderungen an eine automatische Notbremsfunktion

### Rechtzeitigkeit

Die Anforderungen an eine automatische Notbremsfunktion sind in der Rechtzeitigkeit deutlich geringer, da die Reaktionszeit des Fahrers nicht berücksichtigt werden muss. Ausgehend von einer Systemtotzeit  $t_s = 0,2 \text{ s}$  wie in Abschnitt 2.4.1 (vorausgegangene Vorspannung des Systems), wird ein Nutzen (Geschwindigkeitsreduktion) bereits ab einer Auslösung im Bereich von  $t_b > 0,2 \text{ s}$  vor der Kollision generiert. Für eine Kollisionsvermeidung können entsprechend die Zahlen aus Tabelle 2.1 herangezogen werden, die noch um die Totzeit  $t_s$  ergänzt werden müssen.<sup>18</sup> Damit könnte eine Kollision aus einer Ausgangsgeschwindigkeit von  $50 \text{ km/h}$  bei einer Auslösezeit  $t_b$  im Bereich von  $0,9 \text{ s}$  vermieden werden.

### Adäquatheit

Der Vorteil bei der Rechtzeitigkeit wird begleitet vom Nachteil bei der Adäquatheit. Da das System aktiv und automatisch in den Straßenverkehr eingreift, können rechtliche Konsequenzen aus einer Fehlauslösung resultieren, sowie Personen - und Sachschäden hervorgerufen werden. Eine Fehlauslöserate in der Größenordnung der Fehlwarnrate (siehe (2.3)) würde zu einer unberechtigten Bremsung etwa alle 100 Tage führen. Da die meisten adressierten Szenarien während Stadtfahrten auftreten, ist davon auszugehen, dass sich in der Mehrheit der Fälle ein weiteres Fahrzeug hinter dem mit dem System ausgestatteten Fahrzeug befindet. Bei einer ungerechtfertigten Notbremsung, auf die das hinterherfahrende Fahrzeug nicht mehr rechtzeitig reagiert, entsteht somit erheblicher Schaden. In (Ebel et al. 2009) wird durch eine detaillierte „Gefahren - und Risikoanalyse“ eine Größenordnung von  $10^{-6} \text{ h}^{-1}$  für die zulässige Fehlauslöserate einer automatischen Notbremsfunktion hergeleitet.

---

<sup>17</sup>Diese Annahme wäre durch eine Studie zu belegen.

<sup>18</sup>Dies gilt bei einer unbeschleunigten Bewegung des Fußgängers.

### 2.4.3 Allgemeine Anforderungen an die Umfeldsensorik

Die allgemeinen Anforderungen, wie sie in den vorhergehenden Abschnitten hergeleitet wurden, richten sich an die entsprechende Fußgängerschutz-Funktion. Um diese zu erfüllen, muss auch die eingesetzte Umfeldsensorik gewisse Mindestanforderungen erfüllen, die hier abgeleitet werden. Als Sensorik wird hierbei ein Videosystem vorausgesetzt, wie es in den Berechnungen in Abschnitt 2.1 benutzt wurde. Die Anforderungen können in ähnlicher Form jedoch für eine beliebige Umfeldsensorik gelten.

Zu den allgemeinen Anforderungen, die hier thematisiert werden, gehören Reichweite, Öffnungswinkel und Güte<sup>19</sup> der Messdaten (longitudinaler Abstand und Geschwindigkeit, lateraler Versatz und Geschwindigkeit usw.).

#### 1. Reichweite

In Abschnitt 2.4.1 wurde die Forderung nach einer Warnzeit  $t_w > 1,7\text{ s}$  begründet. Das bedeutet, dass bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$  von  $50\text{ km/h} \approx 14\text{ m/s}$  zum Zeitpunkt der Warnung der Abstand zum Fußgänger (Distance to Pedestrian, DTP) gegeben ist durch

$$DTP = v_{ego} \cdot t_w = 14\text{ m/s} \cdot 1,7\text{ s} = 23,8\text{ m}. \quad (2.4)$$

Um die Sicherheit für eine Auslöseentscheidung zu gewährleisten, sollte zu diesem Zeitpunkt der Fußgänger bereits eine Mindestanzahl von Zyklen  $N_{zyk}$  als solcher erkannt worden sein.<sup>20</sup> Als ein geeigneter Wert hat sich hier (für das eingesetzte Videosystem)  $N_{zyk} = 15$  erwiesen. Zusammen mit einer Zykluszeit  $t_{zyk} \approx 40\text{ ms}$  ergibt sich die benötigte Reichweite  $R$  insgesamt zu

$$R \geq v_{ego} \cdot (t_w + N_{zyk} t_{zyk}) = 14\text{ m/s} \cdot 2,3\text{ s} = 32,2\text{ m}. \quad (2.5)$$

#### 2. Öffnungswinkel

Die Anforderung an den Öffnungswinkel  $\theta$  der Sensorik ergibt sich aus der in Abschnitt 2.1 vorgestellten Berechnung und den entsprechenden Ergebnissen in Abbildung 2.4 zu

$$\theta \geq \pm 22^\circ. \quad (2.6)$$

---

<sup>19</sup>Näheres dazu findet sich in Kapitel 6.

<sup>20</sup>Es werden einige Zyklen benötigt, um einen neu erkannten Fußgänger als solchen zu plausibilisieren. Des Weiteren wird ein Tracking des Fußgängers vorausgesetzt, welches ebenfalls einige Zyklen zur Initialisierung benötigt.

## 2.5 Problemstellung und Vorgehensweise

Das Problem, welches in der vorliegenden Arbeit betrachtet wird, ist die wissenschaftlich fundierte Ableitung einer robusten Situationsanalyse und Risikobewertung für ein vorausschauendes Fußgängerschutzsystem. Die Ausprägung des Systems soll dabei sowohl eine Fahrerwarnung als auch eine automatische Notbremsung ermöglichen.<sup>21</sup>

Die größte Herausforderung besteht im Umgang mit mehreren Unsicherheitsfaktoren und der gleichzeitigen Erfüllung der Anforderungen an das System. Der erste Unsicherheitsfaktor ist der Mensch bzw. der Fußgänger selbst. Wie im vorigen Abschnitt gezeigt, muss für eine Warnfunktion das Verhalten des Fußgängers über eine Zeitspanne von bis zu zwei Sekunden prädiziert werden. In dieser Zeit kann sich eine zunächst gefährliche Situation möglicherweise von selbst klären, ebenso kann eine gefährliche Situation plötzlich entstehen. Des Weiteren ist es für eine automatische Notbremsfunktion erforderlich, eine hohe Güte in der Einschätzung der Bewegung des Fußgängers zu erzielen, um so das Risiko einer bevorstehenden Kollision bestimmen zu können.

Daher ist eine Hauptaufgabe dieser Arbeit die Analyse der tatsächlichen Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern, um diese in der Situationsanalyse geeignet berücksichtigen zu können. Zu diesem Zweck wurden Bewegungstests mit Versuchspersonen durchgeführt und ausgehend von den Ergebnissen ein Fußgängerbewegungsmodell entwickelt (Kapitel 4).

Der zweite Unsicherheitsfaktor mit großem Einfluss auf die Situationsanalyse und die Gesamtfunktion ist die Güte der Umfelderkennung. Die Situationsanalyse muss mit fehlerbehafteten Daten umgehen, die keine oder nur geringe Einflüsse auf das Gesamtergebnis ausüben dürfen. Hierbei kann es zu Messfehlern in Attributen kommen, aber auch zu Fehlklassifikationen, d. h. Objekte wurden fälschlich als Fußgänger klassifiziert. Um den Einfluss von Sensorfehlern zu untersuchen, wurde ein Fehlermodell entworfen, das verschiedene Fehlertypen berücksichtigt. Die Fehler orientieren sich dabei an der vorhandenen Sensorik und wurden zum einen heuristisch aus tatsächlichen Messdaten abgeleitet und sind zum anderen theoretisch durch die eingesetzte Sensorik motiviert. Aus der Theorie ergibt sich dabei eine qualitative Aussage über die Art und Verteilung von möglichen Fehlern. Die tatsächlichen Messdaten wurden mit den Daten eines Referenzsensors<sup>22</sup> verglichen, um daraus eine Verteilung für die Messfehler schätzen zu können. Im Gegensatz zu Methoden, die im Bereich des Fault Detection and Isolation eingesetzt werden (Frank 1990), wurden hier die Abweichungen der Messdaten zu einer gegebenen Referenzsensorik

---

<sup>21</sup>Eine automatische Notbremsung wurde mit dem entwickelten Ansatz dargestellt, jedoch konnte im Rahmen dieser Arbeit die Anforderung der Adäquatheit aus Abschnitt 2.4.2 nicht nachgewiesen werden. Hierfür wäre nach aktuellem Stand der Technik (siehe Ebel et al. 2009) ein Dauerlauf in der Größenordnung von  $10^6$  Stunden nötig.

<sup>22</sup>Näheres dazu siehe Kapitel 6.

modelliert. Dadurch war es möglich, die Sensorentwicklung entscheidend zu unterstützen (Kapitel 6).



## 3 Situationsanalyse

### 3.1 Einordnung des Begriffs

Die Aufgabe der Situationsanalyse (SIT) in der Signalverarbeitungskette eines Fahrerassistenzsystems umfasst das Verarbeiten der Informationen verschiedener Sensoren<sup>23</sup> sowie die Interpretation dieser Daten (vgl. Abschnitt 2.2.1).<sup>24</sup>

Im Kontext einer vorausschauenden Fußgängerschutzfunktion ist die Aufgabe der SIT die Erkennung einer gefährlichen Situation mit einem (oder mehreren<sup>25</sup>) durch die Sensorik erkannten Fußgänger. Dies beinhaltet insbesondere die Prädiktion der Bewegung des Fahrzeugs<sup>26</sup> und des Fußgängers sowie die Bestimmung eines Maßes zur Kollisionswahrscheinlichkeit bis hin zur Vorhersage der Unvermeidbarkeit einer Kollision.

Im Falle einer als gefährlich eingestuften Situation wird in der Folge die Ansteuerung der erforderlichen Aktoren (zum Beispiel für eine Warnung) in der Aktionsplanung durchgeführt. Diese beinhaltet auch die Berechnung der Art und Dauer einer getroffenen Maßnahme, basierend auf den Ergebnissen der SIT. Die genaue Abgrenzung zwischen SIT und Aktionsplanung ist nicht eindeutig definiert, sodass es zu Missverständnissen kommen kann, wenn von diesen Modulen gesprochen wird.

Anhand der in Abbildung 3.1 exemplarisch dargestellten Signalverarbeitungskette eines vorausschauenden Fußgängerschutzsystems, soll hier die in der Folge benutzte Abgrenzung der unterschiedlichen Module verdeutlicht werden.

Die dargestellte Stereo-Videosensorik mit anschließender Bildverarbeitungseinheit liefert zunächst die Objektdaten des erkannten Fußgängers an die SIT. Die Objektdaten beinhalten u. a. die relative Position und Geschwindigkeit sowie Gütemaße für den erkannten Fußgänger. Die Inertialsensoren des Fahrzeugs liefern Odometrie-Daten (u. a. Geschwindigkeit, Gierrate) an die SIT, welche für die Prädiktion der Fahrzeugbewegung benutzt werden. Des Weiteren werden in der SIT direkte Eingabedaten des Fahrers (zum Beispiel Blinkerbetätigung, Bremspedalstellung) verwendet, um Informationen über den Fahrer-

---

<sup>23</sup>Dies kann auch vorgelagert in der sog. Sensordatenfusion (SDF) geschehen.

<sup>24</sup>In der Literatur wird teilweise auch der Begriff Situationsinterpretation benutzt.

<sup>25</sup>Im Folgenden wird der Einfachheit halber von nur einem Fußgänger gesprochen.

<sup>26</sup>Die Bewegungsprädiktion des Fahrzeugs ist häufig auch als eigenständiges Modul vor einer Situationsanalyse geschaltet.

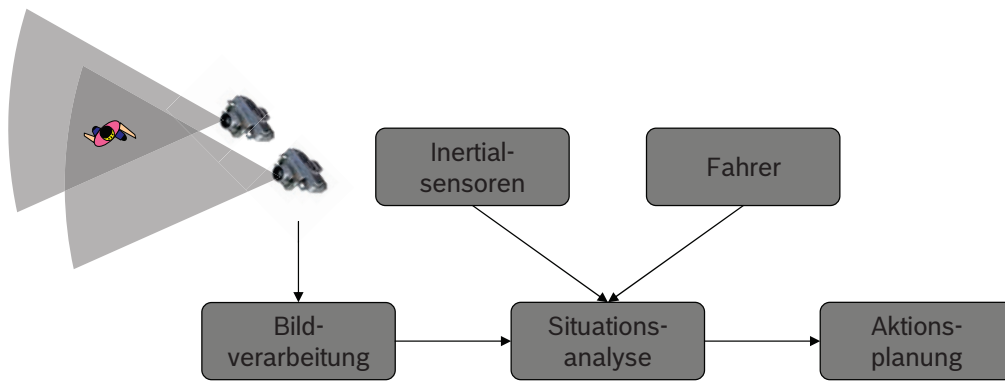


Abbildung 3.1: Situationsanalyse in der Signalverarbeitungskette

wunsch zu erhalten. In der SIT werden diese Daten entsprechend verarbeitet und interpretiert. Dies beinhaltet die Prädiktion des Fahrkorridors des Fahrzeugs sowie der Trajektorie des Fußgängers. Falls eine generelle Gefährdung eines erkannten Fußgängers festgestellt wurde, wird die Kollisionswahrscheinlichkeit bestimmt und zusammen mit anderen relevanten Daten an die Aktionsplanung geliefert. In der Aktionsplanung wird anschließend aus der Kollisionswahrscheinlichkeit eine Handlungsstrategie generiert und angesteuert.

## 3.2 Literaturübersicht - Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird der Stand der Technik für SIT-Verfahren im vorausschauenden Fußgängerschutz vorgestellt. Da in der Literatur häufig die Trennung zwischen SIT und Aktionsplanung nicht exakt ist, werden bei manchen Ansätzen auch die entsprechenden Handlungsstrategien angesprochen (siehe auch Abschnitt 3.1). Weiterhin werden verschiedene Ansätze hinsichtlich ihrer generellen Eignung für ein Warn- und Bremssystem eingeschätzt. Ausgewählte Ansätze wurden in ähnlicher Form implementiert, um eine objektive Bewertung zu ermöglichen. Die Ergebnisse der Bewertung werden in Kapitel 5 präsentiert.

### 3.2.1 Allgemeine Übersicht

In der Literatur gibt es bereits viele Situationsanalyse- und Interpretationsansätze zur Kollisionsvorhersage im allgemeinen Kontext. Als Beispiel sei hier die Arbeit von Kuchar und Yang (Kuchar und Yang 2000) genannt, welche sich mit Kollisionsvorhersagealgorithmen im Bereich der Flugsicherheit beschäftigt und eine gute Übersicht über verschiedene Kategorien solcher Ansätze bietet. Diese sind, mit Einschränkungen auch auf einen anderen Kontext übertragbar. Im Fahrerassistenzkontext sei hier die Dissertation von

Hillenbrand (Hillenbrand 2007) genannt, in der verschiedene zeitliche Kriterien zur Risikobewertung genutzt werden. Das bekannteste zeitliche Kriterium ist dabei die bereits erwähnte *TTC*, welche erstmals in (Lee 1976) erwähnt wird.

Im Kontext des vorausschauenden Fußgängerschutzes bieten die Arbeiten von Gandhi und Trivedi (Gandhi und Trivedi 2006, 2007) eine gute Übersicht über verschiedene Möglichkeiten im Bereich der eingesetzten Sensorik und SIT-Verfahren. Aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Verfahren, welche sich durch Grundidee, Methoden und Informationsbasis unterscheiden, wird in der Folge eine Kategorisierung nach der jeweiligen Grundidee vorgenommen, um die verschiedenen Ansätze vergleichbar zu machen.

### 3.2.2 Kategorisierung

Die Grundideen der verschiedenen Ansätze lassen sich größtenteils in vier verschiedene Kategorien einteilen:

1. ad-hoc Ansätze,
2. geometrische Ansätze,
3. physikalische Ansätze,
4. stochastische Ansätze.

### 3.2.3 Ad-hoc Ansätze

Unter diese Kategorie sollen die Ansätze zusammengefasst werden, die sowohl von der Umsetzung als auch vom Grundgedanken her einfach sind. Der einfachste denkbare Ansatz für die Bestimmung einer Kollisionswahrscheinlichkeit ist die binäre Bewertung, ob sich ein erkannter Fußgänger auf Kollisionskurs mit dem Fahrzeug befindet oder nicht. Hierzu wird die Bewegung des Fahrzeugs und des Fußgängers unter der Annahme der gleichförmigen Bewegung prädiziert und geprüft, ob sich die Trajektorien treffen werden. Die als gleichförmig angenommene Bewegung kann dabei auf der Geschwindigkeit basieren (1. Ordnung) oder auch auf der Annahme der konstanten Beschleunigung (2. Ordnung). In beiden Fällen erhält man ein binäres Ergebnis, nämlich ob der Fußgänger auf Kollisionskurs mit dem Fahrzeug ist oder nicht. Dies ist in Abbildung 3.2 noch einmal veranschaulicht. Der grüne Fußgänger (links) bewegt sich ebenso wie der rote in Richtung des Fahrkorridors des Fahrzeugs, ist jedoch so langsam, dass er den Fahrkorridor erst erreicht, wenn das Fahrzeug bereits an ihm vorbei gefahren ist. Der rote Fußgänger hingegen befindet sich auf direktem Kollisionkurs mit dem Fahrzeug.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup>In der Abbildung ist implizit angenommen, dass der Fußgänger mit der Fahrzeugfront kollidiert. Dies ist nach den Ergebnissen aus Abschnitt 2.1 gerechtfertigt.

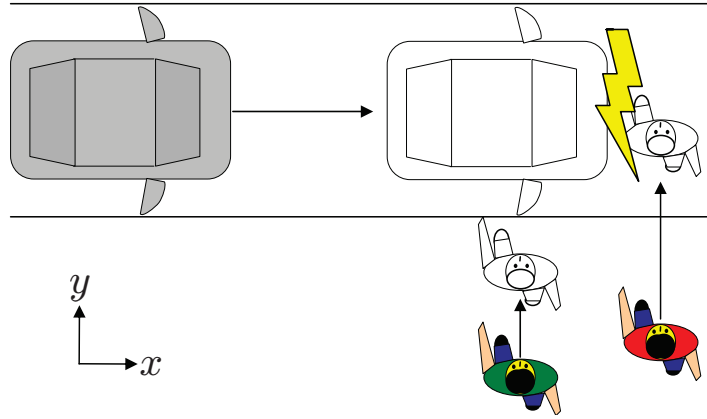


Abbildung 3.2: Veranschaulichung der Kollisionskursbewertung

Eine logische Erweiterung dieses Ansatzes ist der *TTC*-basierte Ansatz, welcher bei vorliegendem Kollisionskurs von Fahrzeug und Fußgänger die noch verbleibende Zeit bis zur prädizierten Kollision bestimmt. Die *TTC* kann berechnet werden durch

$$TTC = \begin{cases} \frac{dx}{v_x^{rel}}, & v_x^{rel} > 0, \\ +\infty, & v_x^{rel} \leq 0, \end{cases} \quad (3.1)$$

mit dem Abstand  $dx$  zwischen Fahrzeug und Fußgänger in  $x$ -Richtung des Fahrzeugs und der relativen Annäherungsgeschwindigkeit  $v_x^{rel}$  des Fußgängers zum Fahrzeug. Unterschreitet die *TTC* in einer kritischen Situation nun vorher festgelegte Schwellwerte, so wird eine hinreichend große Kollisionswahrscheinlichkeit angenommen.

Der Ansatz aus (Hillenbrand 2007) wurde zwar nicht im Kontext des Fußgängerschutzes entwickelt, ist jedoch direkt übertragbar. Hier wird das Risiko u. a. über die Zeit bis zur nötigen Reaktion TTR (Time To React) bewertet. Als Reaktion kann dabei aus Fahrersicht ein Brems- oder Ausweichmanöver dienen. Dies ist zwar im Sinne dieses Abschnitts kein ad-hoc Ansatz, kann aber als Erweiterung des *TTC*-Ansatzes betrachtet werden und wird daher hier erwähnt.

Eine andere Erweiterung eines reinen *TTC*-Ansatzes wird in (Coué et al. 2006) vorgestellt. Hier werden die Größen TCPA (Time To Closest Point of Approach) und DCPA (Distance at Closest Point of Approach) zur Risikobewertung verwendet. Dies stellt insofern eine Erweiterung dar, da im Falle eines vorliegenden Kollisionskurses die Größe TCPA in die *TTC* übergeht.

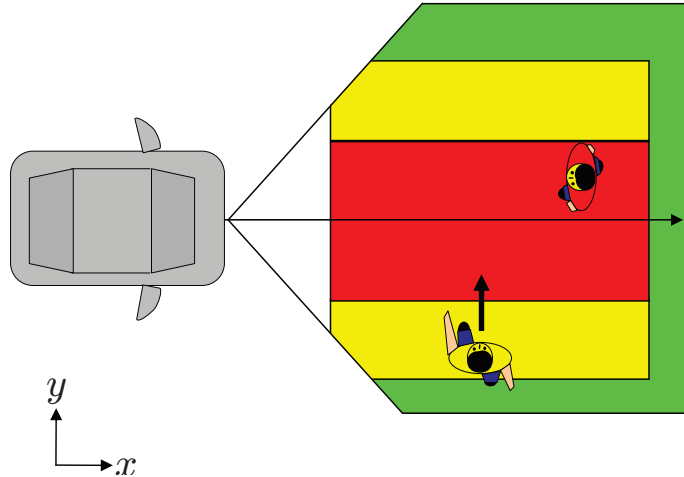


Abbildung 3.3: Gefahrenzonen des SAVE-U Ansatzes (Darstellung nach Munder et al. 2005)

### 3.2.4 Geometrische Ansätze

Geometrische Ansätze verfolgen die Grundidee der geometrischen Gefahrenzonen. Das bedeutet, dass im Bereich vor dem Fahrzeug virtuelle Zonen vordefiniert werden, die dann zur Kritikalitätsbewertung genutzt werden.

In (Munder et al. 2005) wird der im SAVE-U Projekt (siehe auch Abschnitt 2.3.3) genutzte Ansatz beschrieben, welcher aus drei Zonen vor dem Fahrzeug besteht. Die Zonen sind in Abbildung 3.3 dargestellt und bestehen aus einer fahrzeuggeschwindigkeitsadaptiven oberen Grenze für die Entfernung eines erkannten Fußgängers sowie aus seitlichen festen Begrenzungen. Ein Fußgänger im roten Bereich wird hierbei als gefährdet angesehen und es wird entsprechend eine akustische Warnung für den Fahrer ausgegeben. Dies gilt ebenfalls für einen Fußgänger im gelben Bereich, welcher sich in Richtung des roten Bereichs bewegt. Für die automatische Bremsung wird zusätzlich überprüft, ob die Entfernung zu einem Fußgänger im roten Bereich den aktuellen Bremsweg (welcher mit gewissen Annahmen über den Reibwert  $\mu$  und die Verzögerungsleistung bestimmt werden kann) unterschreitet.

Ein vergleichbarer Ansatz wird in (Rodgers et al. 2002, 2004; Rodgers und Blomberg 2008) vorgestellt, der ebenfalls von Warnzonen vor dem Fahrzeug ausgeht, welche sich hier jedoch zusätzlich durch beispielsweise die Blinkerbetätigung des Fahrers verändern können. Dies ist dadurch begründet, dass dieser Ansatz in einem System zum Einsatz kommt, welches Fußgänger über ein GPS-Modul im Fahrzeug und am Fußgänger selbst erkennt (integriert beispielsweise im Mobiltelefon) und dadurch auch Fußgänger außerhalb des Sichtfelds einer Videosensorik erkennen kann. Damit ist es u. a. möglich eine Fahrerwarnung vor einem Abbiegemanöver auszugeben, um den Fahrer auf einen für ihn nicht sichtbaren Fußgänger hinzuweisen.

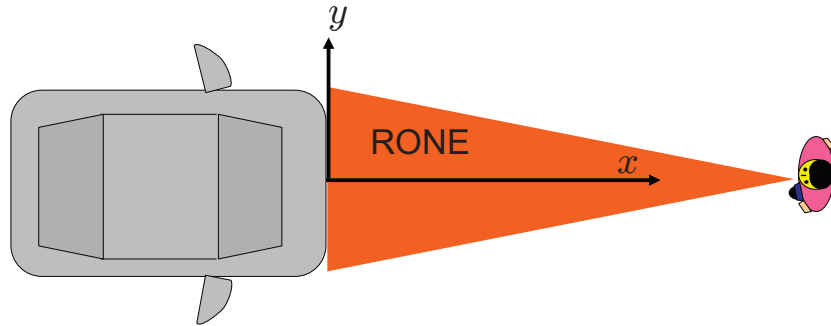


Abbildung 3.4: Veranschaulichung der „Region of no Escape“ (Darstellung nach Fuerstenberg 2005)

### 3.2.5 Physikalische Ansätze

Physikalische Ansätze orientieren sich an den physikalischen/physischen Möglichkeiten der Kollisionspartner. Falls durch Extrapolation der Bewegung des Fußgängers und des Fahrzeugs eine Kollision prädiziert wird, kann durch Annahmen für die Bewegungsmöglichkeiten der Kollisionspartner bestimmt werden, ob die bevorstehende Kollision noch vermeidbar ist. Das bedeutet, dass bei einer erkannten und potenziell gefährlichen Situation aufgrund der gemessenen Attribute (Position, Geschwindigkeit) berechnet wird, ob es zur Kollision kommen wird (unter den gegebenen Annahmen). Ein solcher Ansatz wird in (Fuerstenberg 2005) vorgeschlagen, hier wird die sogenannte RONE („Region of no Escape“) für einen erkannten Fußgänger berechnet (siehe Abbildung 3.4). Innerhalb der RONE sind die Beschleunigungen, welche der Fußgänger und das Fahrzeug aufbringen müssten, um die Kollision zu vermeiden größer als die Ihnen durch die physikalischen Annahmen zugebilligten. Demnach ist in diesem Moment die Kollision selbst bei kooperativem Verhalten von Fußgänger und Fahrzeug (zum Beispiel der Fußgänger flüchtet zur einen Seite, während das Fahrzeug zur anderen ausweicht) unvermeidbar. In (Fuerstenberg 2005) wird die Annahme getroffen, dass sowohl für das Fahrzeug, als auch für den Fußgänger eine konstante Beschleunigung von  $9,81 \text{ m/s}^2$  möglich ist. Die Beschleunigung des Fahrzeugs ergibt sich dabei aus vereinfachten Annahmen zur maximal übertragbaren Führungskraft der Reifen (siehe zum Beispiel Mitschke und Wallentowitz 2004). Die Annahmen für die Bewegungsmöglichkeiten eines Fußgängers sind eine bewusste Überschätzung, welche sich aus Probandentests ergaben, in denen Probanden aufgefordert wurden schnellstmöglich eine Entfernung von 80 cm zu überwinden.

Die getroffenen Annahmen führen in der Berechnung dazu, dass die Unvermeidbarkeit einer Kollision nur wenige 100 ms vor der Kollision feststellbar ist, sodass als mögliche Strategie nur Unfallfolgenminderung durch eine Notbremsung oder den Einsatz aktiver Hauben (siehe auch Abschnitt 2.3.1) in Frage kommt.

Ein anderer Ansatz zur Situationsanalyse und Risikobewertung, welcher ebenfalls physikalische Möglichkeiten der Kollisionspartner berücksichtigt, wird in (Scherf et al. 2008) präsentiert. Die Bestimmung einer Kollisionswahrscheinlichkeit erfolgt hier über den Anteil der Überlappung der prädierten Aufenthaltsgebiete des Fahrzeugs und des Fußgängers. Diese werden ebenfalls mittels Annahmen über die Bewegungsmöglichkeiten für eine feste Zeitspanne berechnet. Die Größe der Schnittmenge der beiden Bereiche kann dann als proportional zu einer Kollisionswahrscheinlichkeit angenommen werden. Die Annahmen, welche hier für die Bewegungsmöglichkeiten des Fußgängers getroffen werden, scheinen bereits ausgereifter als in (Fuerstenberg 2005), sind jedoch nur angedeutet und werden nicht vollständig beschrieben.

Ein vergleichbarer Ansatz wurde in (Nguyen 2010 und Meinecke et al. 2010) vorgestellt, jedoch ebenfalls ohne auf die Einzelheiten der Fußgängerbewegung einzugehen.

### 3.2.6 Stochastische Ansätze

Stochastische Ansätze zur Situationsanalyse benutzen zufallsgesteuerte Prozesse, um die Bewegung von Fußgängern vorherzusagen. Den Ursprung haben diese Ansätze in der makroskopischen Anwendung zur „Crowd Analysis“. Dabei wird das Verhalten einer größeren Ansammlung (Crowd) von Menschen untersucht, um beispielsweise Evakuierungspfade in Gebäuden oder bei Großveranstaltungen planen zu können. Eine Möglichkeit hierzu ist die Simulation der Menschenmasse selbst, beispielsweise mit der Annahme des Verhaltens eines Fluids (Helbing 1992), oder mit der kombinierten Simulation der einzelnen Individuen (siehe zum Beispiel Antonini und Bierlaire 2006; Kretz und Schreckenberg 2006). Letztere Möglichkeit bietet eine Übertragung des angenommenen Modells auf die Situation eines einzelnen Fußgängers im Straßenverkehr, bzw. führte zu neuen Modellen, welche speziell für den Einsatz in der Situationsanalyse für den vorausschauenden Fußgängerschutz entwickelt wurden.

Zunächst sei hier das Modell aus (De Nicolao et al. 2002, 2007) erwähnt, welches die Bewegung des Fußgängers über einen integrierten „Random Walk“ modelliert. Das bedeutet, zu einer gegebenen Ausgangsposition  $(x_0, y_0)^T, (vx_0, vy_0)^T$  in Weltkoordinaten (Abbildung 3.3) wird die Fußgängertrajektorie wie folgt modelliert:

Seien  $t, \Delta t \geq 0$ , dann werden  $(x(t), y(t))^T$  definiert durch:

$$\begin{aligned} x(t + \Delta t) &= x(t) + vx(t), \\ y(t + \Delta t) &= y(t) + vy(t), \\ vx(t + \Delta t) &= vx(t) + \omega x(t), \\ vy(t + \Delta t) &= vy(t) + \omega y(t). \end{aligned} \tag{3.2}$$

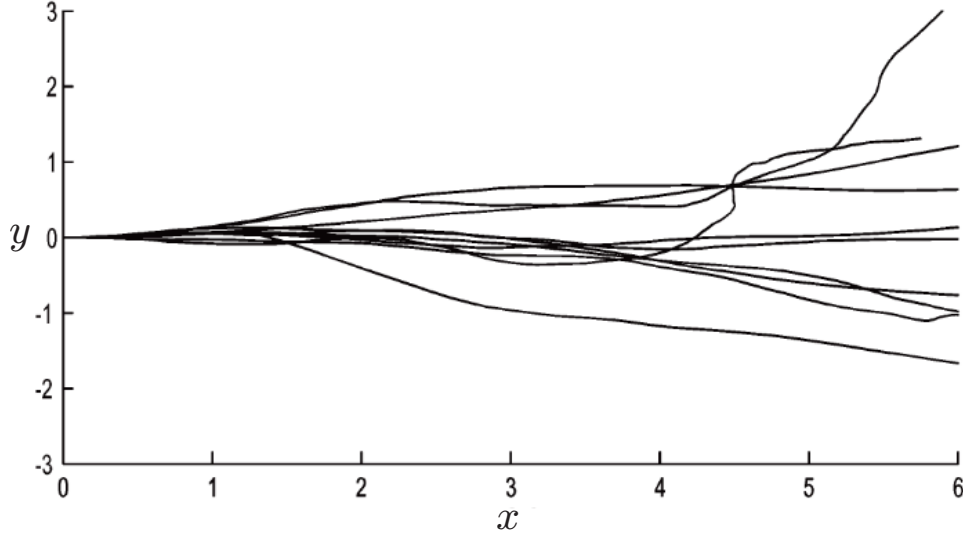


Abbildung 3.5: Zufällige Fußgängertrajektorien im Random Walk Ansatz, Quelle: (De Nicolao et al. 2007)

Die stochastischen Prozesse  $\omega x(\cdot)$  und  $\omega y(\cdot)$  sind dabei als „White Gaussian Noise“ mit Mittelwert null modelliert:

$$\begin{aligned}\omega x(\cdot) &\sim WGN(0, \sigma_x^2), \\ \omega y(\cdot) &\sim WGN(0, \sigma_y^2).\end{aligned}\tag{3.3}$$

Die Anfangsbedingungen ergeben sich aus

$$\begin{aligned}x(0) &= x_0, \\ y(0) &= y_0, \\ vx(0) &= vx_0, \\ vy(0) &= vy_0.\end{aligned}\tag{3.4}$$

Abbildung 3.5 zeigt einige Trajektorien, welche durch das Modell aus (3.2), (3.3), und (3.4) berechnet wurden. Um nun aus dem Modell Kollisionswahrscheinlichkeiten abzuleiten, werden zu einer Vielzahl von Anfangsbedingungen Monte-Carlo Simulationen durchgeführt und Trajektorien wie in Abbildung 3.5 generiert. Die Kollisionswahrscheinlichkeit zu einer gegebenen Anfangssituation ergibt sich dann als relative Häufigkeit der Fälle, die in der Simulation zur Kollision geführt haben. Diese können im Fahrzeug kompakt in Look-Up Tabellen gespeichert werden, sodass bei einer erkannten Situation mit einem Fußgänger nur die generierte Kollisionswahrscheinlichkeit abgerufen werden muss.

Ein ähnlicher Ansatz wird in (Wakim et al. 2004a, b) verfolgt, allerdings wird hier die Fußgängerbewegung über ein Markov-Modell modelliert. Die verschiedenen Zustände des



Modells beschreiben verschiedene Geschwindigkeiten des Fußgängers. Als freie Parameter dienen die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Zuständen.

### 3.2.7 Fazit

An dieser Stelle soll eine Bewertung der vorgestellten Ansätze erfolgen, insbesondere mit Hinblick auf ihre Eignung für eine Warn- und Notbremsfunktion. Ausgewählte Ansätze wurden im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls implementiert und in Simulationen und mit realen Sensordaten getestet. Das Ergebnis der praktischen Bewertung ist in Kapitel 5 zusammengefasst.

Die Bewertung erfolgt anhand der Grundidee der jeweiligen Kategorie eines Ansatzes, da sich die Ansätze innerhalb einer Kategorie teilweise nur wenig unterscheiden. Natürlich kann eine detaillierte Bewertung nicht rein theoretisch durchgeführt werden, aber es können erste Hinweise auf die jeweiligen Vor- und Nachteile gegeben werden.

Für die Bewertung wurden fünf Merkmale ausgewählt, welche für eine erfolgreiche Funktion wichtig sind und die verschiedenen Ansätze bzw. Kategorien jeweils darin bewertet. Die Skala reicht von „—“ „nicht geeignet“ oder „nicht erfüllt“ bis „++“ „voll geeignet“ bzw. „voll erfüllt“. Das Ergebnis ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Die *Fehlerrobustheit* korreliert dabei mit der „Adäquatheit“ aus Abschnitt 2.4. Die Frage ist hier, wie sensibel ein Ansatz auf etwaige Fehler in der Umfelderkennung reagiert und wie häufig es zu Situationen kommen kann, in denen eine nicht adäquate Auslösung erfolgt. Das Merkmal *Nutzen* meint die „Rechtzeitigkeit“ (Abschnitt 2.4) in verschiedenen Nutzenszenen. Für eine hohe Nutzenbewertung muss ein gutes Ergebnis in verschiedenen relevanten Szenen zu erwarten sein. Durch die *Umsetzbarkeit* wird beschrieben, ob ein Ansatz prinzipiell im Fahrzeug umgesetzt werden kann bzw. mit welchem Aufwand dies möglich ist. Das Kriterium der *Determiniertheit* ist im Umfeld von Fahrerassistenzsystemen insofern bedeutsam, als dass eine Nachvollziehbarkeit der Systemreaktionen für den Fahrer gegeben sein muss. Ein System, welches sich in zwei sehr ähnlichen Situationen völlig unterschiedlich verhält, wird vom Fahrer höchstwahrscheinlich abgelehnt werden. Das letzte Merkmal, die *Parametrierbarkeit*, beschreibt, wie leicht sich ein Ansatz an die

Merkmal	ad-hoc	geometrisch	physikalisch	stochastisch
Fehlerrobustheit	—	—	+	o
Nutzen	+	+	+	o
Umsetzbarkeit	++	++	++	+
Determiniertheit	++	++	+	—
Parametrierbarkeit	++	++	+	—

Tabelle 3.1: Bewertung von SIT-Verfahren in ausgewählten Merkmalen

Anforderungen des Gesamtsystems anpassen lässt und hat daher in späteren Entwicklungsschritten größere Bedeutung.

Die *ad-hoc* Ansätze können in vielen Merkmalen gut bewertet werden, da sie durch ihre Einfachheit gut umsetzbar, parametrierbar und auch deterministisch sind. Der Nutzen sollte ebenfalls in den meisten Fällen relativ hoch sein, da zu erwarten ist, dass ein Fußgänger, welcher tatsächlich mit dem Fahrzeug kollidiert, rechtzeitig als gefährdet erkannt wird. Einzig in dem sehr wichtigen Merkmal Fehlerrobustheit ist die Eignung eines solchen Ansatzes sehr zweifelhaft. Durch die Berechnung des Kollisionskurses wird zwar die Dynamik eines Fußgängers durch seine Geschwindigkeit implizit berücksichtigt, allerdings geht diese Information nur durch diese binäre Entscheidung in die Situationsanalyse ein. Es ist zu erwarten, dass sich ein Fußgänger in bestimmten Situationen mit einer geringen *TTC* auf Kollisionskurs mit dem Fahrzeug befinden kann und die Situation dennoch nicht kritisch ist, da der Fußgänger beispielsweise noch problemlos vor dem Eintreten in den Fahrkorridor anhalten kann.<sup>28</sup>

Die *geometrischen Ansätze* wurden sehr ähnlich den *ad-hoc* Ansätzen bewertet, da sie ebenfalls durch ihre relative Einfachheit in den Merkmalen Determiniertheit, Parametrierbarkeit sowie Umsetzbarkeit sehr gut abschneiden. Der Nutzen wird in den meisten Szenen ebenso hoch sein, da die relativ großen Warnbereiche vor dem Fahrzeug so gestaltet sind, dass ein gefährdeter Fußgänger vor einer Kollision darin erkannt wird. In der Kategorie Fehlerrobustheit stellt sich allerdings die Frage der Eignung. Die bereits angesprochenen (teilweise sehr) großen und einfach gestalteten Warnbereiche sind anfällig für kleine Fehler in der Umfelderkennung oder auch im Situationsverständnis. Hier kommt insbesondere zum Tragen, dass in diesen Ansätzen die Fußgängerdynamik kaum Berücksichtigung findet und allenfalls die Bewegungsrichtung des Fußgängers ausgewertet wird. Dadurch kann es wie bei den *ad-hoc* Ansätzen zu Warnungen vor ungefährdeten Fußgängern kommen, welche sich beispielsweise langsam dem Fahrkorridor nähern und anschließend stehen bleiben.

Die Idee des *physikalischen Ansatzes* wurde im Vergleich sehr gut bewertet, da sie prinzipiell für alle Merkmale gute Ergebnisse verspricht. Hierzu muss allerdings erwähnt werden, dass die Ausprägung des Ansatzes nicht in der Form wie sie in (Fuerstenberg 2005) vorgestellt wird (RONE-Ansatz) bewertet wird, da hier der Nutzen für eine Warnfunktion nicht gegeben wäre. Durch die hohen Annahmen an die Bewegungsmöglichkeiten eines Fußgängers bei diesem Ansatz kann hier eine Auslöseentscheidung nur wenige 100 ms vor der unvermeidbaren Kollision getroffen werden. Dies reicht im besten Fall zur Reduktion der Kollisionsgeschwindigkeit um wenige km/h, eine Unfallvermeidung durch Bremsung bzw. durch Fahrerwarnung wäre jedoch nicht möglich. Die prinzipielle Idee des Ansatzes ist jedoch insgesamt vielversprechend, da sie sich an den entscheidenden Größen für den

---

<sup>28</sup>Für eine nähere Betrachtung siehe auch Abschnitt 3.3.1.

Verlauf einer kritischen Situation orientiert. Des Weiteren bietet sie die Möglichkeit, den Nutzen zu erhöhen und trotzdem in den anderen Merkmalen nicht viel schlechter zu werden. Die Determiniertheit und Parametrierbarkeit sind nur leicht schlechter einzustufen, als beim einem geometrischen oder ad-hoc Ansatz. Die Fehlerrobustheit verspricht durch die explizit mögliche Berücksichtigung der Fußgängerdynamik jedoch deutlich besser zu sein, da insgesamt mehr Informationen über einen erkannten Fußgänger zur Risikoeinschätzung benutzt werden. Ein sich langsam dem Fahrkorridor nähernder Fußgänger beispielsweise wird nicht sofort eine Systemreaktion auslösen, da erkannt werden kann, dass dieser noch problemlos vor dem Erreichen des Fahrkorridors anhalten kann.

Ein *stochastischer Ansatz* hat die größten Nachteile in der sehr schlechten Parametrierbarkeit und womöglich nicht vorhandenen Determiniertheit. Die schlechte Parametrierbarkeit zeigt sich beispielsweise in (De Nicolao et al. 2007). Hier wird angegeben, dass für jede betrachtete Ausgangssituation insgesamt 1000 Simulation durchgeführt wurden. Zusammen mit einem vierdimensionalen Bereich für die Ausgangsdaten (Geschwindigkeit, Position lateral und longitudinal relativ zum Fahrzeug) ergibt sich ein Simulationsaufwand in der Größenordnung von mehreren 100 Millionen Simulationen. Bei einer Änderung der Parameter müssen diese entsprechend wiederholt werden. Die Determiniertheit wurde schlecht bewertet, da ähnliche Szenen durch die stochastischen Elemente nicht unbedingt zu ähnlichen Systemreaktionen führen müssen. Der Nutzen und die Fehlerrobustheit sind relativ schwer im Vorfeld abzuschätzen, dürften jedoch stark von dem gewählten stochastischen Modell und insbesondere den Freiheitsgraden, welche dem Fußgänger darin eingeräumt werden, abhängen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass in der bisherigen Form keiner der Ansätze alle Anforderungen zu erfüllen scheint. Eine denkbare Kombination von verschiedenen Elementen der einzelnen Ansätze wird an dieser Stelle ebenfalls kaum zu Verbesserungen führen. Die Nachteile eines stochastischen Ansatzes beispielsweise bleiben auch in Kombination mit anderen Elementen erhalten. Die Kombination eines ad-hoc und eines geometrischen Ansatzes wird ohne weitere Elemente allenfalls die Fehlerrobustheit des besseren der beiden Ansätze aufweisen. Eine höhere Fehlerrobustheit kann jedoch durch die Auswertung weiterer Informationen über den Fußgänger erreicht werden, d. h. eine geeignete Berücksichtigung der Fußgänger-Dynamik. In einem physikalischen Ansatz ist dieser Gedanke zwar grundlegend vorhanden, in den bisherigen Ansätzen jedoch entweder als „Worst-Case“ Ansatz (d. h. die Möglichkeiten des Fußgängers werden bewusst überschätzt) oder in einer nicht vollständig differenzierten Weise.

Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit ein neuer Ansatz entwickelt, welcher auf einem differenzierten Fußgängerbewegungsmodell aufbaut, um die Annahmen für die Bewegungsmöglichkeiten eines Fußgängers zu verbessern (Kapitel 4). Dieser neue Ansatz wurde zusammen mit anderen Ansätzen aus dem obigen Vergleich implementiert, sodass

die Bewertungen anhand von realen und simulierten Daten überprüft werden kann (siehe Kapitel 5).

### 3.3 Entwicklung des PMM - Ansatzes

Wie im vorigen Abschnitt motiviert, wurde ein neuer Situationsanalyse-Ansatz entwickelt, welcher auf einem differenzierten Fußgänger-Bewegungsmodell basiert. In der Folge wird dieser Ansatz PMM-Ansatz („Pedestrian Motion Model“) genannt. Das Bewegungsmodell hat hierbei die Aufgabe, die Bewegungsmöglichkeiten eines Fußgängers in verschiedenen Situationen möglichst gut abzubilden. Bevor das Modell jedoch vorgestellt wird, wird in diesem Abschnitt zunächst gezeigt, wie das Bewegungsmodell genutzt werden kann, um eine geeignete Risikobewertung für eine Warn- und Bremsfunktion zu ermöglichen.

#### 3.3.1 Grundidee

Der Grundgedanke hinter dem neu entwickelten Ansatz ist ähnlich zu den beschriebenen physikalischen Ansätzen an der Fußgängerdynamik orientiert. Um die Frage aus Abschnitt 2.4 nach der Adäquatheit einer Warnung oder Bremsung zu beantworten, ist die folgende Überlegung hilfreich:

*„Wie würde ein Fahrer unter den gegebenen Informationen eine gefährliche Situation mit einem Fußgänger einschätzen?“*

Diese Frage führt fast zwangsläufig zu der Aussage, dass die Gefahr umso größer ist, je schneller sich der Fußgänger dem Fahrzeug nähert (und umgekehrt). Dies führt zunächst auf den *TTC*-Ansatz, welcher aber nicht die Information berücksichtigt, welche sich zusätzlich aus der Geschwindigkeit des Fußgängers ableiten lässt. Ein sich dem Fahrzeug nähernder, schnell bewegter Fußgänger benötigt beispielsweise deutlich mehr Zeit zum Anhalten, als ein langsamer Fußgänger. Bei gleicher *TTC* (und damit unterschiedlichem Abstand) kann der langsame Fußgänger möglicherweise noch problemlos halten und hat dies eventuell auch geplant. Ein schneller Fußgänger, welcher in der zur Verfügung stehenden Zeit eventuell gar nicht mehr anhalten kann, wird höchstwahrscheinlich auch nicht die Absicht haben, dies zu tun. Dies deutet darauf hin, dass er das Fahrzeug übersehen hat und nicht anhalten wird.

Aus der Sicht des Fahrers lässt sich ein solcher Ansatz wie folgt beschreiben: „Eine Situation wird als kritischer angesehen als eine andere, je schwieriger es für den Fußgänger ist, eine drohende Kollision noch selbst zu vermeiden.“ Das Vermeiden bedeutet für den Fußgänger eine Änderung seiner bisherigen Bewegungsrichtung und kann prinzipiell durch Beschleunigung, Verzögerung und/oder Richtungsänderung geschehen.

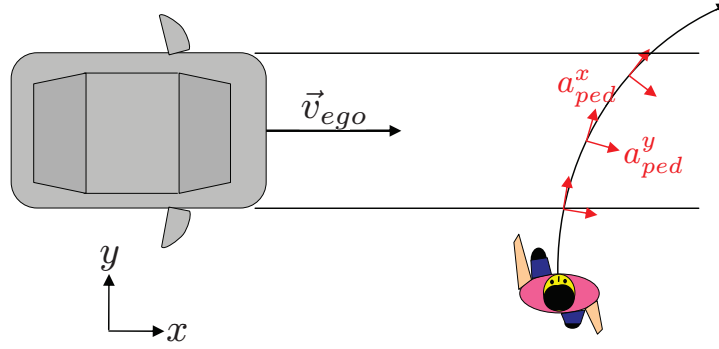


Abbildung 3.6: Darstellung einer Fußgängertrajektorie

Ausgehend von dieser Grundüberlegung wurde der PMM-Ansatz entwickelt, welcher die für den Fußgänger günstigsten Trajektorien berechnet. Mithilfe des Bewegungsmodells werden diese Trajektorien anschließend bewertet und so eine Komfortstufe generiert, mit welcher der Fußgänger die drohende Kollision selbstständig vermeiden kann. Darauf aufbauend wird anschließend die Aktionsplanung durchgeführt.

### 3.3.2 Modellierung der Fußgängerbewegung

Ausgehend von der typischen Szene eines lateral querenden Fußgängers (siehe auch Abschnitt 2.1), stellt sich zunächst die Frage, wie der Fußgänger selbst eine drohende Kollision vermeiden kann. Angenommen der Fußgänger würde ohne eine Änderung seiner Bewegung mit dem Fahrzeug kollidieren, so bleiben ihm zur Vermeidung zwei Freiheitsgrade (Vertikalbewegungen werden vernachlässigt) welche hier zunächst beschrieben werden. Eine naheliegende Überlegung für die Modellierung der Bewegung eines Fußgängers im zweidimensionalen Raum stellt das *begleitende Dreibein* bzw. *Zweibein* (in einer zweidimensionalen Ebene) dar (Nolting 1989). Die Übertragung dieses Konzepts auf einen Fußgänger führt zur Modellierung des Fußgängers als einfachen Massepunkt mit zweidimensionalen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren. Aus Sicht des Fußgängers bedeutet dies, dass eine Änderung der aktuellen Bewegung durch eine Beschleunigung in  $x$ -Richtung oder in  $y$ -Richtung seines lokalen Koordinatensystems (tangential bzw. orthogonal zu seiner Trajektorie) möglich ist (siehe Abbildung 3.6). Durch diese Beschreibung könnten beliebige Fußgängertrajektorien berechnet werden, welche anschließend bewertet werden müssten. Für eine sinnvolle Bewertung müssen jedoch zunächst einige weitere Annahmen getroffen werden, um die Anzahl der zu berechnenden Trajektorien einzuschränken. Zunächst erscheint die Modellierung eines Fußgängers über Tangential- und Querbeschleunigung dem intuitiven Verständnis der Fußgängerbewegung zu widersprechen. Selbstverständlich können sich Fußgänger seitlich oder schräg bewegen, es scheint jedoch sinnvoller zu sein, die Querbeschleunigungskomponente als eine Drehung aufzu-

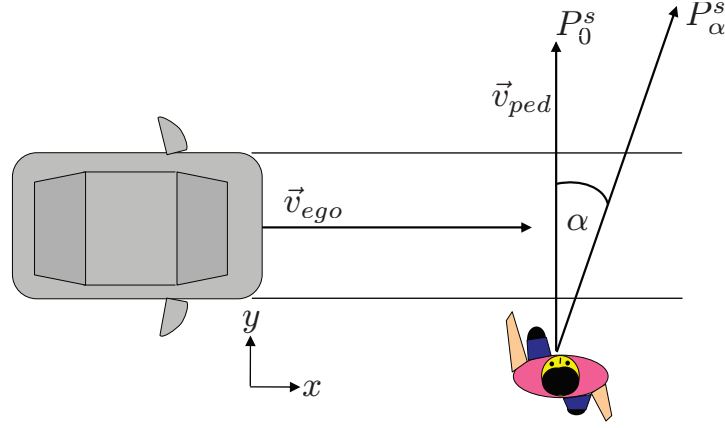


Abbildung 3.7: Typische Fußgängersituation in Welt-Koordinaten

fassen. Fußgänger tendieren dazu, in die Richtung zu blicken, in die sie gehen und ihren Körper so auszurichten, dass eine einfache, gerade Fortbewegung möglich ist. Daher wird die Fußgängerbewegung im Folgenden in Polarkoordinaten ausgedrückt, für die Geschwindigkeit bedeutet dies

$$\vec{v}_{ped} = \begin{pmatrix} v_p \sin \alpha \\ v_p \cos \alpha \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Hierbei ist  $v_p$  der Betrag der Tangentialgeschwindigkeit und  $\alpha$  die Bewegungsrichtung in einem ortsfesten Koordinatensystem. Eine Bewegungsänderung ist folglich durch Beschleunigung in Tangentialrichtung

$$a_{ped} = \frac{dv_p}{dt} \quad (3.6)$$

und/oder Drehung um einen Winkel  $\Delta\alpha$  mit Drehgeschwindigkeit

$$\omega_{ped} = \frac{d\alpha}{dt} \quad (3.7)$$

möglich. Zur Veranschaulichung siehe auch Abbildung 3.7. Die mögliche Drehgeschwindigkeit wird dabei von der Geschwindigkeit  $v_p$  abhängen (siehe auch Abschnitt 4.8).

Um nun die Anzahl der möglichen Trajektorien für den Fußgänger zu verringern, werden zunächst die Spezialfälle der Änderung jeweils eines Freiheitsgrades untersucht.

### Spezialfall Drehung

Unter Vernachlässigung einer Geschwindigkeitsänderung und unter der Annahme, dass eine Richtungsänderung beliebig schnell möglich ist, soll hier zunächst die Frage geklärt werden, welche Richtungsänderung für den Fußgänger in einer Situation wie sie in Abbildung 3.7 illustriert ist, vorteilhaft ist. Dies führt auf die folgende Aufgabe:

Es gelten die Bezeichnungen aus Abbildung 3.7, (3.5) sowie  $P_\alpha^s = (x_\alpha^s, y_\alpha^s)^T$ . Des Weiteren sei ohne Beschränkung der Allgemeinheit die Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs

$$\vec{v}_{ego} = \begin{pmatrix} v_e \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

Die Ausgangspositionen des Fußgängers und des Fahrzeugs im Welt-Koordinatensystem sei zum Zeitpunkt  $t = 0$  gegeben durch

$$(x_{ego}(0), y_{ego}(0))^T = (0, y_{ego}^0)^T \quad (3.9)$$

$$(x_{ped}(0), y_{ped}(0))^T = (x_{ped}^0, 0)^T. \quad (3.10)$$

Damit liegt der Ursprung des Welt-Koordinatensystems wie in Abbildung 3.7 angedeutet.

Es wird nun der Winkel  $\alpha > 0$  gesucht, welcher zum Zeitpunkt an dem sich das Fahrzeug und der Fußgänger auf gleicher Höhe befinden (in  $x$ -Richtung) (3.12), den lateralen Abstand des Fußgängers zum Fahrzeug maximiert (3.11).<sup>29</sup> Hierbei werden  $v_p$  und  $v_e$  als konstant angenommen. Das bedeutet, es wird

$$F(\alpha) = y_\alpha^s \quad (3.11)$$

unter der folgenden Nebenbedingung maximiert:

$$tv_e = x_\alpha^s. \quad (3.12)$$

Nun wird der Quotient der Beträge der beiden Geschwindigkeiten

$$r := \frac{v_p}{v_e} \quad (3.13)$$

definiert und ohne Beschränkung der Allgemeinheit angenommen, dass

$$0 < r < 1 \quad (3.14)$$

sowie

$$v_p \sin \alpha < v_e \quad (3.15)$$

gilt. Hier bedeuten (3.14) und (3.15), dass der Fußgänger und das Fahrzeug tatsächlich eine gleiche Höhe erreichen werden.

---

<sup>29</sup>Hier bedeutet  $\alpha > 0$ , dass der Fußgänger nicht zusätzlich dem Fahrzeug entgegen geht.

Aus (3.12) folgt nun:

$$\begin{aligned}
tv_e &= x_{ped}^0 + tv_p \sin \alpha \\
\Leftrightarrow tv_e &= x_{ped}^0 + trv_e \sin \alpha \\
\Leftrightarrow t &= \frac{x_{ped}^0}{v_e(1 - r \sin \alpha)}.
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Mit (3.16) folgt aus (3.11)

$$\begin{aligned}
F(\alpha) &= y_\alpha^s \\
&= tv_p \cos \alpha \\
&= \frac{x_{ped}^0}{v_e(1 - r \sin \alpha)} v_e r \cos \alpha \\
&= x_{ped}^0 \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha}.
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Die Berechnung der Ableitung nach  $\alpha$  ergibt damit

$$\begin{aligned}
\frac{d}{d\alpha} F(\alpha) &= x_{ped}^0 r \frac{r \sin^2 \alpha - \sin \alpha + r \cos^2 \alpha}{(1 - r \sin \alpha)^2} \\
&= x_{ped}^0 r \frac{r - \sin \alpha}{(1 - r \sin \alpha)^2}.
\end{aligned} \tag{3.18}$$

Da für den Winkel  $\alpha^*$ , welcher den lateralen Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger maximiert

$$\frac{d}{d\alpha} F(\alpha^*) = 0 \tag{3.19}$$

gelten muss, folgt:

$$\alpha^* = \arcsin r = \arcsin \frac{v_p}{v_e}. \tag{3.20}$$

Es handelt sich hierbei in der Tat um ein Maximum, da gilt

$$\frac{d^2}{d\alpha^2} F(\alpha^*) = -x_{ped}^0 \frac{r}{\sqrt{(1 - r^2)^3}} < 0. \tag{3.21}$$

Die für den Fußgänger günstigste Richtungsänderung  $\alpha^*$  soll nun näher betrachtet werden. In Abbildung 3.8 ist  $\alpha^*$  in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Fußgängers und des Fahrzeugs aufgetragen. Es zeigt sich, dass in den aus unfallstatistischer Sicht relevanten Geschwindigkeitskonfigurationen der ideale Winkel  $\alpha^*$  kaum mehr als  $20^\circ$  beträgt. Um



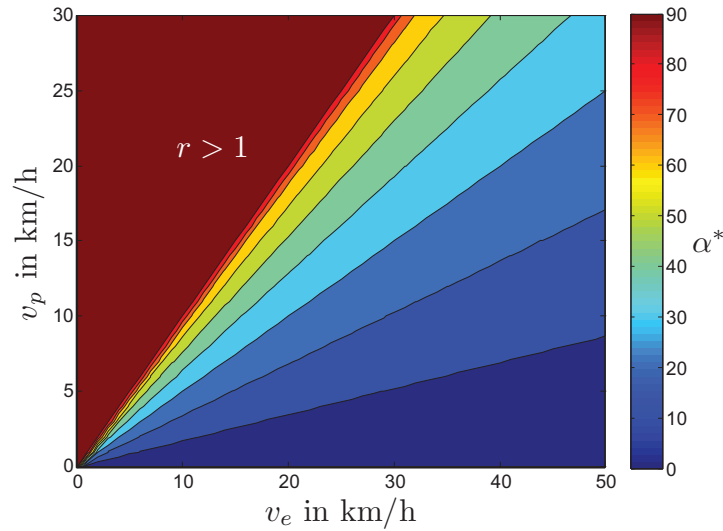


Abbildung 3.8:  $\alpha^*$  in Abhängigkeit von  $v_p$  und  $v_e$

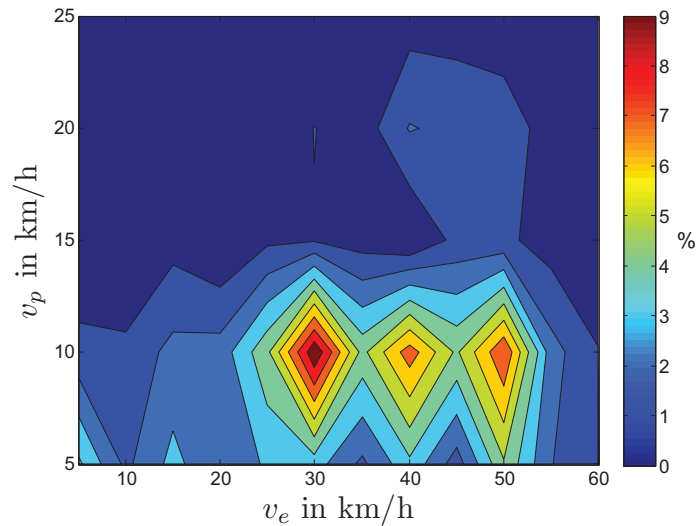


Abbildung 3.9: Geschwindigkeitskonfigurationen bei Pkw-Fußgänger-Unfällen

dies zu veranschaulichen, wurden in Abbildung 3.9 die Ausgangsgeschwindigkeiten<sup>30</sup> der Kollisionspartner in 150 der in Kapitel 2 untersuchten Pkw-Fußgänger-Unfälle dargestellt.

Die Zeit, welche der Fußgänger für die Richtungsänderung benötigen würde, ist hier noch nicht berücksichtigt und würde den optimalen Winkel  $\alpha^*$  weiter verringern. Daher scheint der Spezialfall Drehung alleine nicht sinnvoll zu sein.

<sup>30</sup>In den Fällen, in denen die Ausgangsgeschwindigkeit bekannt war und unter 60 km/h lag. Die Ausgangsgeschwindigkeit der Fußgänger wurde durch ein Umrechnungsverfahren (siehe Kapitel 4) aus subjektiven Angaben von Unfallzeugen ermittelt.

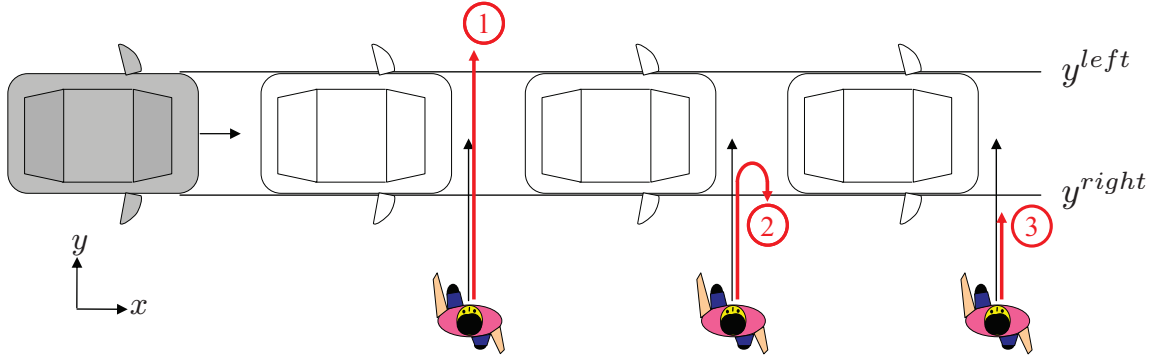


Abbildung 3.10: Fluchtmöglichkeiten eines lateral querenden Fußgängers

### Spezialfall Beschleunigung und Verzögerung

In diesem Abschnitt wird eine mögliche Drehung bzw. Richtungsänderung des Fußgängers vernachlässigt<sup>31</sup>, sodass er zur Kollisionsvermeidung entweder beschleunigen oder verzögern kann.

Die damit verbleibenden Trajektorien des Fußgängers (in der Folge auch Fluchtmöglichkeiten) sollen an dieser Stelle beschrieben werden. Es sei  $TTP > 0$  (Time To Pedestrian) die Zeit, bei der sich der Fußgänger und das Fahrzeug auf gleicher Höhe befinden, d. h. es gilt

$$x_{ego}(TTP) = x_{ped}(TTP).$$

Damit ist  $TTP$  genau die Zeit, welche durch (3.12) charakterisiert ist und im Falle einer tatsächlich eintretenden Kollision gilt  $TTP = TTC$ . Ausgehend von einer unveränderten Bewegung des Fahrzeugs werden an dieser Stelle drei Fluchtmöglichkeiten des Fußgängers betrachtet. Diese sind in Abbildung 3.10 dargestellt.

Die erste Fluchtmöglichkeit des Fußgängers besteht darin, zu beschleunigen, um noch rechtzeitig in  $TTP$  die ihm gegenüberliegende Seite des Fahrkorridors zu erreichen. Die zweite Möglichkeit besteht darin zu verzögern, kurzzeitig in den Fahrkorridor einzutreten und diesen durch weitere Verzögerung wieder zu verlassen. Das bedeutet auch, dass der Fußgänger seine Bewegungsrichtung um  $180^\circ$  ändern muss, bzw. mathematisch gesehen rückwärts geht. Die Realisierung einer solchen Trajektorie wird Kapitel 4 diskutiert. Die dritte und letzte Möglichkeit sieht vor, dass der Fußgänger rechtzeitig vor dem Eintreten in den Fahrkorridor anhält.

Die drei Möglichkeiten können durch die Bewegungsgleichung

$$y_{ped}(t) = y_{ped}^0 + tv_p^0 + \frac{1}{2}t^2a_{ped} \quad (3.22)$$

<sup>31</sup>Abgesehen vom Fall des kompletten Umdrehens bzw. Rückwärtsgehens.

beschrieben werden. Hier ist  $y_{ped}(t)$  die laterale Position des Fußgängers zum Zeitpunkt  $t$ . Die Geschwindigkeit des Fußgängers zum Zeitpunkt  $t = 0$  ist  $v_p(0) = v_p^0$  und seine Beschleunigung  $a_{ped} = const$ . Die Beschleunigungen, welche nötig sind, um die drei Möglichkeiten durchzuführen, lassen sich nun mit der Angabe der Zielpunkte<sup>32</sup> des Fußgängers berechnen. Diese seien in diesem Fall die Grenzen des Fahrkorridors  $y^{left}$  und  $y^{right}$ , welche sich bei Bedarf noch um Sicherheitsbereiche erweitern lassen (siehe auch Abschnitt 3.3.3).

Für die Beschleunigung  $a_{ped,1}$  in Möglichkeit 1 gilt nun:

$$\begin{aligned} y^{left} &= y_{ped}^0 + TTP v_p^0 + \frac{1}{2} TTP^2 a_{ped,1} \\ \Leftrightarrow a_{ped,1} &= 2TTP^{-1} [TTP^{-1} (y^{left} - y_{ped}^0) - v_p^0]. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Analog erhält man für die Beschleunigung in Möglichkeit 2:

$$a_{ped,2} = 2TTP^{-1} [TTP^{-1} (y^{right} - y_{ped}^0) - v_p^0]. \quad (3.24)$$

Wie bereits erwähnt, wird diese Möglichkeit in Kapitel 4 noch einmal diskutiert, da diese ein zusätzliches Umdrehen des Fußgängers erfordert. Des Weiteren muss bei dieser Möglichkeit geprüft werden, ob das Ergebnis aus (3.24) tatsächlich zulässig ist. Setzt man dieses in Gleichung (3.22) ein, so können sich zwei Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  ergeben, zu denen (3.22) mit  $y_{ped}(t) = y^{right}$  erfüllt ist. Dabei sind

$$t_{1/2} = -\frac{v_p^0}{a_{ped,2}} \pm \sqrt{\left(\frac{v_p^0}{a_{ped,2}}\right)^2 - \frac{2(y_{ped}^0 - y^{right})}{a_{ped,2}}}. \quad (3.25)$$

Nur falls

$$t_1, t_2 \leq TTP \quad (3.26)$$

erfüllt ist, hat der Fußgänger den Fahrkorridor rechtzeitig verlassen und Möglichkeit 2 kann in Betracht gezogen werden.

Die dritte Möglichkeit des rechtzeitigen Anhaltens vor dem Eintritt in den Fahrkorridor kann ebenfalls über Gleichung (3.22) zusammen mit der Gleichung für die Geschwindigkeit

$$v_p = v_p^0 + t a_{ped} \quad (3.27)$$

---

<sup>32</sup>In der Folge wird von einem von rechts querenden Fußgänger ausgegangen. Die Berechnung verläuft analog für einen Fußgänger, der sich von links nähert.

berechnet werden. Aus (3.22) und (3.27) ergibt sich die bekannte Formel für den Bremsweg  $s$  zu

$$s = \frac{(v_p^0)^2}{2a_{ped}}. \quad (3.28)$$

Damit berechnet sich die benötigte Beschleunigung  $a_{ped,3}$  des Fußgängers für ein rechtzeitiges Anhalten vor Eintritt in den Fahrkorridor zu

$$a_{ped,3} = \frac{(v_p^0)^2}{2(y^{right} - y_{ped}^0)}. \quad (3.29)$$

Die drei theoretischen Fluchtmöglichkeiten des Fußgängers sind nun durch die drei Beschleunigungen  $a_{ped,1}$ ,  $a_{ped,2}$  und  $a_{ped,3}$  charakterisiert. Je nach Position des Fußgängers kann dabei Möglichkeit drei ausgeschlossen werden, falls sich der Fußgänger bereits im Fahrkorridor befindet.

Zusätzlich zu den drei bestimmten Fluchtmöglichkeiten ließen sich durch eine Kombination mit einer Richtungsänderung noch weitere Fluchtmöglichkeiten betrachten. Dies wurde jedoch aus folgenden Gründen nicht berücksichtigt und wird stattdessen in Abschnitt 4.8 beschrieben. Es wurde im vorigen Abschnitt gezeigt, dass eine alleinige Drehung des Fußgängers in den meisten relevanten Geschwindigkeitskonfigurationen nicht sehr groß ausfallen sollte. Des Weiteren würden die kombinierten Trajektorien deutlich mehr Rechenleistung im Vergleich zum erwarteten Zusatznutzen benötigen. Es hat sich gezeigt, dass für den Einsatz im Fahrzeug der Spezialfall ohne Drehung zu guten Ergebnissen führt und schnell berechnet werden kann. Daher wird in der Folge nur dieser weiterverfolgt und der allgemeine Fall nur theoretisch in Abschnitt 4.8 besprochen.

Die Aufgabe des Bewegungsmodells (Kapitel 4) in der Situationsanalyse wird nun sein, die möglichen Trajektorien auf Durchführbarkeit für den Fußgänger zu überprüfen und eine Komfortstufe für jede Trajektorie an die Situationsanalyse zurückzuliefern. Aufbauend darauf wird dann die Aktionsplanung durchgeführt.

### 3.3.3 Funktionsausprägung und Sicherheitsbereiche

Die Berechnungen im vorigen Abschnitt bezogen sich jeweils auf einen punktförmigen Fußgänger und müssen (wie bereits erwähnt) dementsprechend noch um zusätzliche Sicherheitsbereiche erweitert werden. Ausgehend vom Schwerpunkt des Fußgängers würde sonst das Fahrzeug mit dem Fußgänger bei allen berechneten Möglichkeiten kollidieren.

Um dieses zu umgehen, kann ein konstanter zusätzlicher Bereich seitlich des Fahrzeugs gewählt werden, welcher dem Radius eines den Fußgänger umgebenden Kreises (aus der Vogelperspektive) entspricht. Aufgrund der Funktionsausprägung, welche im Folgenden

dargestellt wird, wurden zusätzlich hierzu komplexere Sicherheitsbereiche gewählt, die eine differenzierte Warnstrategie in der Aktionsplanung ermöglichen.

## Warnstrategie

Wie in Abschnitt 2.4 beschrieben, ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor für eine Fahrerwarnung, die Wahrnehmbarkeit für den Fahrer. Dazu muss nach Möglichkeit die Modalität der Warnung für den Fahrer intuitiv zu verstehen sein. Ein weiterer hilfreicher Aspekt kann zusätzlich darin bestehen, den Fahrer die Warnung in gewisser Weise erlernen zu lassen. Natürlich darf aus Gründen der Adäquatheit eine Warnung nicht unangebracht ausgegeben werden, daher sieht die hier verfolgte Warnstrategie als eine Vorstufe der Warnung, eine Art dezente Aufmerksamkeitssteuerung vor. Diese Aufmerksamkeitssteuerung soll auch dann ausgegeben werden, wenn der Fahrer zügig ohne ausreichenden Sicherheitsabstand an einem Fußgänger vorbeifährt. Obwohl es hier nicht zur Kollision kommt und auch zu keinem Zeitpunkt eine bevorstehende Kollision prädiziert wurde, soll dadurch ein Hinweis an den Fahrer gegeben werden, dass es sich um eine potenziell gefährliche Situation handelt.

## Sicherheitsbereiche

Um die Aufmerksamkeitssteuerung zu verwirklichen, wird der beschriebene konstante Sicherheitsbereich, welcher durch die Berücksichtigung der Position des Fußgängers als Punkt nötig ist, um einen geschwindigkeitsadaptiven Bestandteil erweitert. Hierbei wurde in einem ersten Schritt mit einem zur Fahrzeuggeschwindigkeit proportionalen zusätzlichen Bereich gearbeitet. Die Zielpositionen  $y^{left}$  und  $y^{right}$ , wie sie in (3.23), (3.24) und (3.29) berücksichtigt sind, werden dabei durch

$$y^{left*} = y^{left} + sd(v_e), \quad (3.30)$$

$$y^{right*} = y^{right} - sd(v_e) \quad (3.31)$$

ersetzt. Hierbei ist  $sd(v_e)$  definiert durch

$$sd(v_e) = \min(\max(sd_{min}, f_{sd}v_e), sd_{max}). \quad (3.32)$$

Der nicht zu unterschreitende Sicherheitsabstand  $sd_{min}$  entspricht dabei der bereits angesprochenen benötigten Korrektur um den Umkreisradius des Fußgängers;  $sd_{max}$  stellt eine zusätzliche Maximalbedingung dar, welche hier als  $sd_{max} = 1$  m gewählt wurde. Zwischen  $sd_{min}$  und  $sd_{max}$  ist der Sicherheitsbereich proportional zur Fahrzeuggeschwindigkeit mit dem zeitlichen Faktor  $f_{sd}$ . Als ein geeigneter Wert hat sich dabei  $f_{sd} = 0,1$  s erwiesen

(siehe auch Abschnitt 4.7). Festzuhalten ist, dass (3.30) und (3.31) nur für die Bestimmung der Vorwarnung/Aufmerksamkeitssteuerung zum Einsatz kommen und nicht für die eigentliche Warnung oder einen möglichen Bremseneingriff.

Für die genaue Ausgestaltung der letztendlich umgesetzten Warnmodalitäten siehe auch Kapitel 7.

### 3.3.4 Fahrkorridor

Die in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Trajektorienberechnung bezieht sich auf eine Szene mit einem orthogonal zum Fahrzeug querenden Fußgänger. Des Weiteren wurde für das Fahrzeug eine eindimensionale Bewegung ohne Gierwinkel angenommen. Dies ist insofern eine berechtigte Annahme, da aus den Unfallforschungsergebnissen bekannt ist (siehe Abschnitt 2.1), dass dies eine gute Näherung für die meisten adressierten „Überschreiten-Unfälle“ darstellt. Die aus unfallstatistischer Sicht ebenfalls relevanten „Abbiege-Unfälle“ werden mit dem dargestellten System nicht adressiert und hier auch nicht berücksichtigt. Dennoch kann es auch bei einem Unfall mit einem lateral querenden Fußgänger zu einer Gierbewegung des Fahrzeugs kommen, falls sich die Szene beispielsweise bei einer leichten Kurvenfahrt ereignet. Um diese Fälle ebenfalls zu adressieren, wird eine Prädiktion des Fahrkorridors über einige Sekunden benötigt. Die bisherige Trajektorienberechnung des Fußgängers wird dabei weiter genutzt, jedoch wird vorher eine Koordinatentransformation mit Bezug auf den berechneten Fahrkorridor durchgeführt.

Die Berechnung des Fahrkorridors selbst geschieht unter Berücksichtigung der aktuellen Gierrate  $\dot{\psi}$ , der Geschwindigkeit  $v_e$  und des Lenkradwinkels  $\delta$ . Nachdem der Fahrkorridor berechnet ist, kann die Bewegung des Fußgängers relativ zu diesem dargestellt werden und in diesen Relativkoordinaten in die Situationsanalyse eingehen.

## 4 Das Bewegungsmodell

In Kapitel 3 wurde der Ansatz zur Situationsanalyse vorgestellt, welcher die für einen Fußgänger möglichen Trajektorien/Fluchtmöglichkeiten in einer gefährlichen Situation mit einem Fahrzeug berechnet. Die Bewertung der Durchführbarkeit dieser Fluchtmöglichkeiten wird in diesem Kapitel präsentiert. Zuvor wird begründet, warum es eines neuen Modells für die Fußgängerbewegungsmöglichkeiten bedarf und welche Studien es im Bereich der Fußgängerbewegung bereits gibt. Anschließend wird das entwickelte Modell einschließlich der durchgeführten Probandentests dargestellt. Die Ergebnisse, welche sich durch das Modell in der Situationsanalyse ergeben, werden danach präsentiert.

### 4.1 Motivation

Wie im Abschnitt 3.2.5 erwähnt, wird in (Fuerstenberg 2005) von einer möglichen isotropen und konstanten Fußgängerbeschleunigung von  $9,81 \text{ m/s}^2$  ausgegangen. Die tatsächlich mögliche Beschleunigung (und damit die mögliche Trajektorienänderung) eines Fußgängers ist in der Realität von vielen verschiedenen Faktoren abhängig. Diese Faktoren lassen sich generell in zwei Arten klassifizieren, in die hier sogenannten *Fußgänger-intrinsische* und *Situations-intrinsische* Faktoren.

Als Fußgänger-intrinsische Faktoren werden in der Folge Einflussgrößen bezeichnet, die speziell für den jeweiligen Fußgänger gelten. Als Beispiele hierfür seien die Physis und das Alter des Fußgängers sowie Kleidung und Schuhwerk genannt. Situations-intrinsische Faktoren gelten für jeden Fußgänger und beschreiben den Einfluss der jeweiligen Situation auf die Bewegungsmöglichkeiten. Hier sind insbesondere die zur Verfügung stehende Zeit, die Bewegungsgeschwindigkeit und die Bewegungsrichtung des Fußgängers zu nennen. Ebenfalls in diese Kategorie fällt die allgemeine Infrastruktur, zum Beispiel die Beschaffenheit der Straßenoberfläche oder das Vorhandensein von Hindernissen.

Viele dieser Faktoren können jedoch (noch) nicht mittels Umfelderkennung detektiert und demnach auch nicht in der Situationsanalyse verwendet werden. Insbesondere Fußgänger-intrinsische Faktoren sind schwer bis teilweise unmöglich mittels umfelderfassenden Sensoren zu detektieren. Situations-intrinsische Faktoren hingegen stehen mit aktueller Umfelderkennung mit Einschränkungen zur Verfügung und werden im hier präsentierten Be-

wegungsmodell benutzt. Die zur Verfügung stehenden Größen und ihr Einfluss auf die Bewegungsmöglichkeiten werden an dieser Stelle erläutert.

- *Zeit*: Die mögliche Bewegungsänderung des Fußgängers hängt stark davon ab, welche Zeit zur Bewegungsänderung zur Verfügung steht. Insbesondere sind Beschleunigungsverläufe von Fußgängern nicht konstant über feste Zeitspannen.
- *Geschwindigkeit*: Die mögliche Beschleunigung eines Fußgängers ist im hohen Maße abhängig von seiner aktuellen Geschwindigkeit. Ein stehender Fußgänger kann deutlich stärker beschleunigen als ein sich bereits schnell bewegendes.
- *Aktuelle und gewünschte Bewegungsrichtung*: Von einem allgemeinen zweidimensionalen<sup>33</sup> Bewegungsraum ausgehend, hängt die mögliche Beschleunigung des Fußgängers davon ab, in welche Richtung die Beschleunigung erfolgen soll. Im eindimensionalen Fall ist zu unterscheiden, ob der Fußgänger in die gleiche Richtung beschleunigen oder entgegen seiner bisherigen Bewegungsrichtung verzögern soll. Der allgemeine zweidimensionale Fall wird in Abschnitt 4.8 diskutiert.

Bevor das Bewegungsmodell vorgestellt wird, das die obigen Faktoren berücksichtigt, um eine Aussage über die Durchführbarkeit einer Fluchtmöglichkeit für den Fußgänger zu treffen, wird an dieser Stelle auf existierende Studien zu den Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern und auf die tatsächlich in Unfallsituationen auftretenden Geschwindigkeiten eingegangen.

#### 4.1.1 Bisherige Studien

Aufgrund der Relevanz von Fußgängergeschwindigkeiten bei der Unfallrekonstruktion wurden in diesem Umfeld bereits mehrfach Studien durchgeführt, um die Geschwindigkeit eines Fußgängers in Abhängigkeit des Alters, des Geschlechts und der von Zeugen genannten Bewegungsart bestimmen zu können. Bereits 1977 führten Eberhardt und Himbert (Eberhardt und Himbert 1977) ausführliche Studien mit Probanden aller Altersklassen (von 3 bis 85 Jahren) durch. Des Weiteren wurden verschiedene andere Faktoren berücksichtigt, zum Beispiel gehbehinderte Fußgänger mit Krücken, Rollstuhlfahrer oder Fußgänger mit Gips. Es wurde hier jedoch nicht direkt eine Geschwindigkeit oder gar Beschleunigung gemessen, sondern mittels Lichtschranken jene Zeit, die ein Proband benötigte, um eine Strecke von 10 m zurückzulegen. Zeitliche Messungen wurden bei 1 m, 3 m, 6 m und 10 m durchgeführt. Dadurch lassen sich vier Durchschnittsgeschwindigkeiten ableiten sowie drei Werte zur Durchschnittsbeschleunigung, welche anschließend interpoliert werden können. Der in der vorliegenden Arbeit relevante Zeitraum vor einer drohenden Kollision von zwei bis maximal drei Sekunden wird hier von zwei bis maximal

---

<sup>33</sup>Eine vertikale Bewegung wird in dieser Arbeit als vernachlässigbar angesehen.



drei Messwerten erfasst, sodass die Werte ungeeignet sind, um daraus ein detailliertes oder belastbares Bewegungsmodell abzuleiten und zu parametrieren.

In der Arbeit von Hein (Hein 1994) wurden ähnliche Messungen mit deutlich weniger Probanden durchgeführt. Dafür wurde hier die Beschleunigung der Probanden mittels eines dreiachsigen Beschleunigungssensors auf einem Messwagen gemessen. Dieser war durch eine Stange mit dem Probanden verbunden. Obwohl explizit auf geringes Gewicht der Messapparatur geachtet wurde (0,9 kg Zusatzlast) ist nicht bekannt, inwiefern die Apparatur den natürlichen Bewegungsablauf der Probanden gestört hat. Die durchgeführten Tests wurden ähnlich zu (Eberhardt und Himbert 1977) in den Kategorien „gehen“, „schnell gehen“, „laufen“ und „rennen“ durchgeführt. Die ermittelten Beschleunigungswerte geben bereits einen Anhaltspunkt zu möglichen Beschleunigungsverläufen aus dem Stand in die verschiedenen Bewegungszustände.

Im Kontext der Unfallrekonstruktion existieren weitere Richtwerte zu Ermittlung von typischen Fußgängergeschwindigkeiten, siehe zum Beispiel (Ahlgrimm et al. 2009; Petersen 2011; Vaughan und Bain 2001). Die Richtwerte aus (Petersen 2011) wurden auch in dieser Arbeit während der Unfallanalyse verwendet (siehe Abschnitt 4.1.2).

Es wurden ebenso einige Untersuchungen über das Verhalten von Fußgängern im realen Verkehr durchgeführt, so zum Beispiel in (Knoblauch et al. 1996) und (Fugger et al. 2000), wie schnell Fußgänger beim Umspringen einer Signalanlage reagieren (Reaktionszeit) und mit welcher Geschwindigkeit sie Kreuzungen überqueren.

### 4.1.2 Fußgängergeschwindigkeit im realen Unfallgeschehen

Die bereits in Kapitel 3 präsentierte Analyse der Fußgängergeschwindigkeit (vgl. Abbildung 3.9) im realen Unfallgeschehen wird im Folgenden näher betrachtet. Vorausgeschickt sei, dass im Gegensatz zu der Fahrzeuggeschwindigkeit, welche gestützt auf Bremsspuren oder andere Hinweise teilweise rekonstruiert werden kann (vgl. Appel et al. 2002; Burg et al. 2009), die Geschwindigkeit von Fußgängern meist nur durch Zeugenaussagen ermittelt wird. Das bedeutet, es existiert keine objektive Angabe zu der Geschwindigkeit, sondern lediglich eine subjektive Beschreibung in der Form „langsam gehen“, „gehen“, „rennen“, etc. Um aus diesen Angaben auf eine tatsächliche Geschwindigkeit rückschließen zu können, wurden die Richtwerte aus (Petersen 2011) benutzt. Diese sind in Abhängigkeit des Alters, des Geschlechts und der unterschiedlichen Bewegungsart in Abbildung 4.1 dargestellt.

Mittels dieser Werte ist es möglich, die subjektiven Aussagen in Geschwindigkeitsangaben umzurechnen. Dies erfolgte für 206 der 217 in Kapitel 2 untersuchten Unfälle.<sup>34</sup> Das

---

<sup>34</sup>In elf Fällen war die Geschwindigkeit des Fußgängers als unbekannt angegeben.

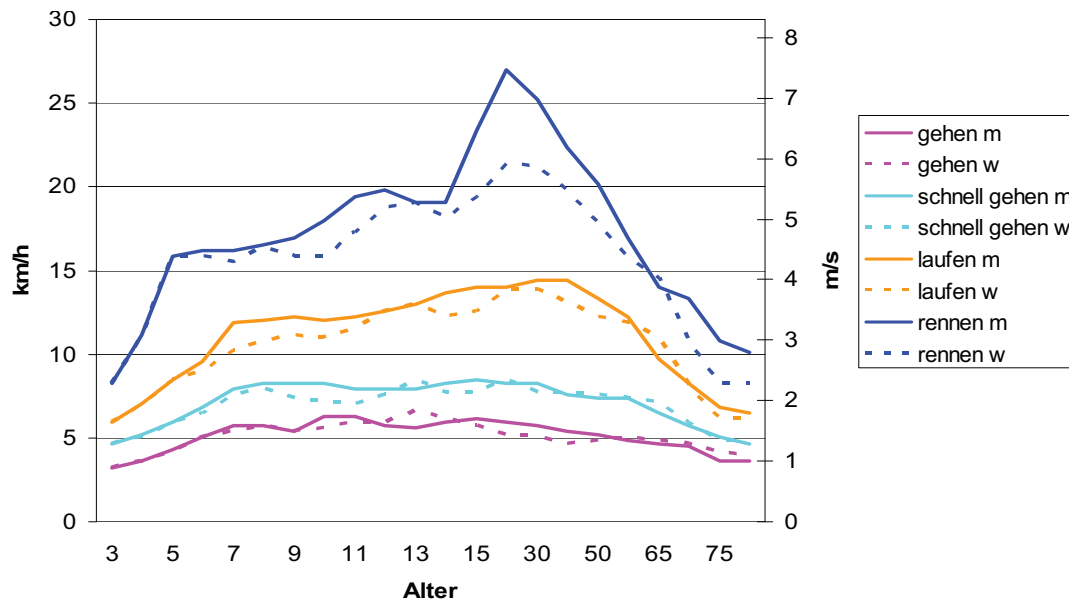


Abbildung 4.1: Typische Geschwindigkeiten von Fußgängern abhängig von Alter, Geschlecht und Bewegungsart, Quelle: nach (Petersen 2011)

Ergebnis ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Die dargestellten Werte sind als Schätzung zu verstehen, u. a. weil bei der subjektiven Bewertung die Bewegungsart „gehen“ deutlich häufiger genannt wird (in jedem dritten Fall) als alle anderen Bewegungsarten. Trotzdem lässt sich durch Abbildung 4.2 vermuten, dass ein nicht geringer Teil der Fußgänger (hier 36 %) mit einer Geschwindigkeit größer als 2 m/s mit dem Fahrzeug kollidiert ist. Bei diesen Geschwindigkeiten kann der Einfluss auf die Bewegungsmöglichkeiten des Fußgängers bereits sehr groß sein.

## 4.2 Bewegungszustände

Die Grundidee des Modells, die Situations-intrinsischen Faktoren, wie sie im Abschnitt 4.1 beschrieben wurden, für die Prädiktion der Bewegungsmöglichkeiten des Fußgängers zu nutzen, erfordert zunächst eine Kategorisierung der möglichen Bewegungszustände eines Fußgängers. Eine solche Kategorisierung wurde bereits bei der Berechnung der Fußgängergeschwindigkeiten im vorigen Abschnitt benutzt. Die Einteilung wurde aus (Petersen 2011) übernommen und wird in ähnlicher Form auch in (Eberhardt und Himbert 1977) und (Hein 1994) benutzt. Im Folgenden wird die Geschwindigkeit eines Fußgängers in vier verschiedene Stufen unterteilt:

- *Stehen*: Der Fußgänger bewegt sich nicht.
- *Gehen*: Der Fußgänger geht, d. h., es befindet sich zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Fuß auf dem Boden. Typische Geschwindigkeiten in diesem Bereich betragen bis zu 1,8 m/s.

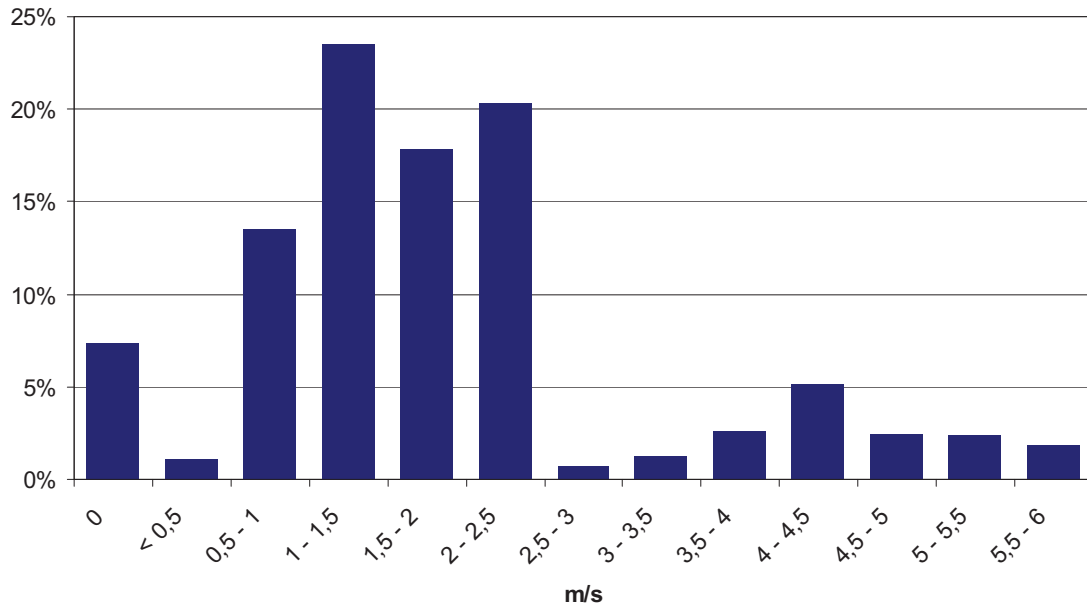


Abbildung 4.2: Umgerechnete Geschwindigkeiten von Fußgängern vor der Kollision

- *Laufen*: Der Fußgänger läuft, d. h., in jedem Schritt befindet sich kurzzeitig kein Fuß auf dem Boden. Dieser Zustand wurde von den Probanden (siehe Abschnitt 4.3) am besten als „leichtes Joggen“ verstanden. Typische Geschwindigkeiten sind je nach Fußgänger 2 bis 4 m/s.
- *Rennen*: Der Fußgänger rennt, d. h., er bewegt sich nahezu so schnell wie physisch möglich. Die Abgrenzung zum Zustand „Laufen“ liegt in dieser Arbeit insbesondere darin, dass mit „Rennen“ die maximal schnelle Bewegung des Fußgängers gemeint ist, welche im Allgemeinen nur für kurze Zeit erreicht und gehalten werden kann. Typische Geschwindigkeiten beginnen ab 4 m/s und reichen bis ca. 6 bis 7 m/s.

Die beschriebenen Bewegungszustände werden im Modell benutzt, um zunächst die Geschwindigkeit eines erkannten Fußgängers gemäß dieser Zustände zu klassifizieren. Da die Bestimmung der Bewegungsmöglichkeiten abhängig von der Geschwindigkeit, der Zeit und der gewünschten Richtung erfolgen soll, wurden zwischen den Bewegungszuständen Übergänge in verschiedene Richtungen definiert. Diese wurden anschließend in der Probandenstudie getestet. Dabei wurde der zeitliche Verlauf der Beschleunigung zwischen den Bewegungszuständen ermittelt. Dieser Verlauf dient später zur Bewertung der möglichen Bewegungsänderung eines Fußgängers.

Die einzelnen Übergänge sind in Abbildung 4.3 zusammengefasst. Die Übergänge von oben nach unten deuten dabei eine Beschleunigung an, die anderen Übergänge entsprechen jeweils einer Verzögerung. Bei den Verzögerungsübergängen wurde weiterhin zwischen zwei Arten des Übergangs unterschieden, zum einen so schnell wie möglich und zum anderen komfortabel. Dies ermöglicht eine differenzierte Abstufung bei der Bewer-

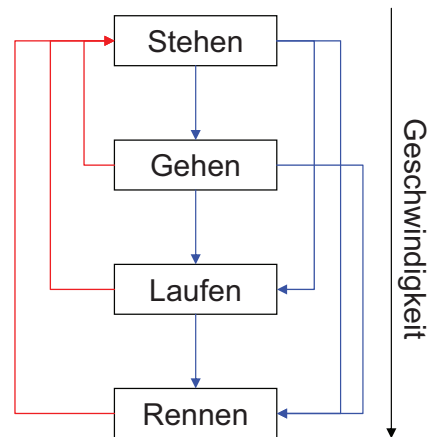


Abbildung 4.3: Bewegungszustände und Übergänge

tung einer möglichen Verzögerung. Eine ähnliche Differenzierung war für die Beschleunigungsübergänge nicht nötig, da sich hier die maximale Beschleunigung jeweils beim Übergang zum Zustand Rennen ergibt. Eine komfortable Beschleunigung wird entsprechend abgestuft für die Übergänge in den Zustand Laufen bzw. Gehen definiert (siehe Abschnitt 4.6).

### 4.3 Probandenstudie

Die typischen Beschleunigungsverläufe in den unterschiedlichen Übergängen wurden durch eine Probandenstudie ermittelt. Zur Messung der Bewegung der Probanden wurde ein Racelogic VBox III 100 Hz Speed Sensor eingesetzt (siehe Abbildung 4.4 links). Es wurde hierbei nicht direkt die Beschleunigung des Probanden gemessen, sondern die Geschwindigkeit, welche über den Dopplereffekt bei der Bewegung relativ zu den sichtbaren GPS-Satelliten bestimmt wird (vgl. Serrano et al. 2004; Zhang et al. 2006).

Die Güte der gemessenen Geschwindigkeit hängt wesentlich von der Anzahl der sichtbaren Satelliten ab. Daher wurde bei der Messung darauf geachtet, dass mindestens fünf Satelli-



Abbildung 4.4: Links: Racelogic VBox (Quelle: Racelogic), Rechts: VBox im Rucksack eines Probanden

ten für das System sichtbar waren. Bei dieser oder einer größeren Anzahl an sichtbaren Satelliten erreicht die Geschwindigkeitsmessung eine Güte von bis zu 0,028 m/s (0,1 km/h) bei einer Auflösung von 0,0028 m/s (0,01 km/h) (vgl. auch Racelogic 2011a, b). Um die Sichtbarkeit genügend vieler Satelliten sicherzustellen, wurden die Tests auf einem freien Gelände mit möglichst wenig Abschottung durch Gebäude durchgeführt.

Die VBox wurde zusammen mit einer mobilen Stromversorgung in einem Rucksack vom Probanden während der Tests getragen (siehe Abbildung 4.4, rechts). Da Rucksack, VBox und Stromversorgung zusammen nicht mehr als 3,5 kg wogen, kann davon ausgegangen werden, dass die Probanden dadurch nur geringfügig beeinträchtigt waren. Der Empfänger der VBox (die Antenne) wurde auf dem Schulterpolster des Rucksacks befestigt. Dadurch ergaben sich in den Messwerten geringe periodische Schwankungen durch den natürlichen Bewegungsapparat, welche im Nachhinein herausgefiltert wurden (siehe Abschnitt 4.4). Die Messdaten wurden direkt von der VBox mit einer Frequenz von 100 Hz auf eine wechselbare Speicherkarte geschrieben, sodass die Daten später ausgewertet werden konnten. Die Aufnahme wurde automatisch durch Bewegung der Antenne gestartet und nach einigen Sekunden Stillstand wieder gestoppt.

Zu der Durchführung und Auswertung der Probandentests sei angemerkt, dass alle Bedingungen und Maßnahmen dort wo es nötig bzw. sinnvoll erschien, im Sinne einer tendenziellen Überschätzung der Bewegungsmöglichkeiten getroffen wurden. Für die Funktion bzw. Situationsanalyse, welche später auf das Bewegungsmodell zurückgreift, bedeutet dies im Zweifelsfall eine eher konservative Auslegung.

### 4.3.1 Testbedingungen

Die Tests wurden von insgesamt zwölf Probanden (acht männlich, vier weiblich) im Alter von 25 bis 38 Jahren durchgeführt. Das Durchschnittsalter der Probanden lag bei 30,5 Jahren, was im Hinblick auf Abbildung 4.1 bereits darauf hin deutet, dass die Probandengruppe im Vergleich zu einem durchschnittlichen Fußgänger eher größere Bewegungsmöglichkeiten aufweist. Des Weiteren trugen alle Probanden normale Kleidung, d. h. weder spezielle Sportkleidung noch besonders hinderliche Kleidung. Hierzu gehört auch, dass das Schuhwerk der Probanden von Sportschuhen (Sneakers) bis zu normalen Lederschuhen reichte, jedoch kein Proband Absatz-Schuhe getragen hat, welche vielleicht die Bewegungsmöglichkeiten eingeschränkt hätten. Die Tests fanden auf einem asphaltierten Weg bei größtenteils gutem Wetter statt, sodass die Haftungsbedingungen insgesamt als sehr gut zu beschreiben sind.

Insgesamt ist festzuhalten, dass der Probandengruppe unter den gegebenen Bedingungen eher größere Bewegungsmöglichkeiten zuzuschreiben sind als einem durchschnittlichen Fußgänger. Dies ist bewusst so gewählt und es wurde auf weitere denkbare Tests mit Ein-

schränkungen der Bewegungsmöglichkeiten durch zusätzliche Last, andere Schuhe oder anderen Untergrund verzichtet, da diese Einschränkungen (bisher) nicht von der Umfeldsensorik erkannt werden können. Demnach wird in der Situationsanalyse von den Möglichkeiten eines durchschnittlichen bis überdurchschnittlichen Fußgängers ausgegangen. Wie bereits erwähnt, bedeutet dies für die Situationsanalyse und das Gesamtsystem, dass im Zweifel später reagiert wird, da dem Fußgänger mehr Möglichkeiten zugestanden werden.

### 4.3.2 Durchführung

Jeder der zwölf Probanden wurde gebeten, die in Abbildung 4.3 dargestellten Übergänge mehrfach durchzuführen. Die Übergänge teilen sich in sechs mit Beschleunigung in die ursprüngliche Bewegungsrichtung und sechs mit negativer Beschleunigung bzw. Verzögerung auf. Wie bereits beschrieben, wurden die Probanden gebeten, bei den Verzögerungsübergängen zum einen komfortabel anzuhalten und in einem weiteren Durchgang jeweils so schnell wie möglich zum Stehen zu kommen. Um das Ergebnis nicht zu sehr durch die Messung zu verfälschen, sollten die Probanden den entsprechenden Übergang nicht beliebig, sondern ausgelöst durch einen externen Reiz durchführen.<sup>35</sup> Auf diese Weise ist das Ergebnis eher mit der Bewegung eines Fußgängers zu vergleichen, der beispielsweise ein sich näherndes Fahrzeug erkennt und schnell anhält.

Jeder Proband wiederholte die Übergänge wenigstens vier Mal. Somit ergaben sich für jeden Probanden mindestens 48 durchzuführende Übergänge. Durch ausreichend Pausen zwischen den einzelnen Übergangsarten und auch zwischen den Wiederholungen sowie eine Variation der Übergangsreihenfolge zwischen den Probanden sollte sichergestellt werden, dass keine weiteren Effekte die Bewegungen der Probanden beeinflussten.

---

<sup>35</sup>Eine gewisse Verfälschung ist trotzdem zu erwarten gewesen, da die Probanden um den Reiz (Zurufen) wussten.

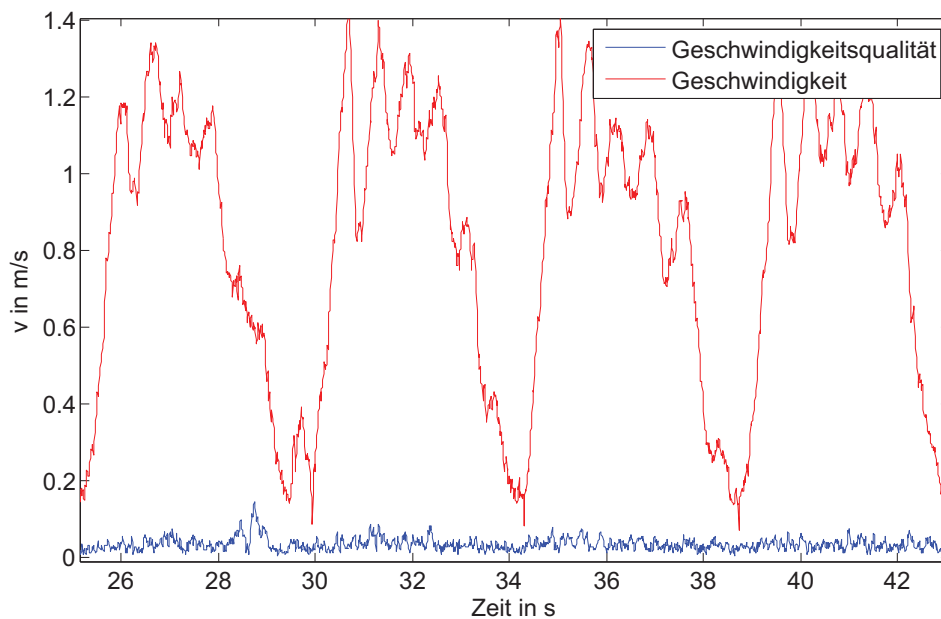


Abbildung 4.5: Beispielmessung mit VBox (Gehen), Geschwindigkeit  $v$  und Geschwindigkeitsqualität

## 4.4 Auswertung

### 4.4.1 Qualität des Signals

Die Aussagekraft der durchgeführten Tests hängt wesentlich von der Qualität des gemessenen Signals ab. Wie in Abschnitt 4.3 bereits beschrieben, kann unter guten Bedingungen laut Hersteller der VBox eine maximale Abweichung von ca.  $0,028 \text{ m/s}$  ( $0,1 \text{ km/h}$ ) erreicht werden (vgl. Racelogic 2011a, b). Die VBox selbst liefert außer dem Geschwindigkeitssignal viele weitere Daten, u. a. eine Bewegungsrichtung („Heading“), welche in Abschnitt 4.8 benutzt wird sowie eine Geschwindigkeitsqualität („Velocity Quality“). Die Angabe der „Velocity Quality“ wird durch den wahrscheinlichen Fehler im Raum („Spherical Probable Error“, SPE) bestimmt. Abbildung 4.5 zeigt eine Beispielmessung eines Probanden bei dem Übergang „Stehen zum Gehen“. In rot (obere Kurve) dargestellt ist das Geschwindigkeitssignal, in blau die angegebene Geschwindigkeitsqualität. Der Mittelwert der Geschwindigkeitsqualität in dieser Messung beträgt  $0,037 \text{ m/s}$  ( $0,13 \text{ km/h}$ ) mit einer Standardabweichung von  $0,017 \text{ m/s}$  ( $0,061 \text{ km/h}$ ) und ist damit nah an dem angegebenen möglichen Wert von  $0,028 \text{ m/s}$  ( $0,1 \text{ km/h}$ ). Beim Geschwindigkeitssignal fällt auf, dass die Schwankungen, welche durch die Position der Antenne auf der Schulter des Probanden hervorgerufen werden, deutlich größer ausfallen als der durchschnittliche Fehler in der Geschwindigkeit. Da diese Schwankungen herausgefiltert werden müssen (s. nächster Abschnitt), fällt der Fehler in der Geschwindigkeit hier nicht sehr stark ins Gewicht. Ebenfalls auffällig an dem Geschwindigkeitssignal ist, dass die Geschwindigkeit

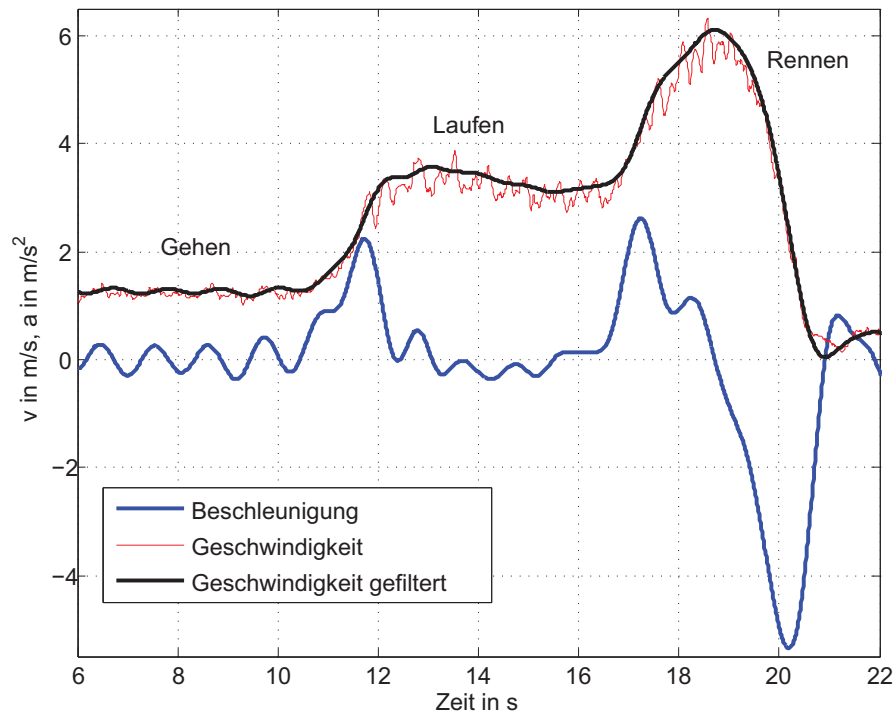


Abbildung 4.6: Beispielmessung mit VBox, Geschwindigkeit  $v$  (mit und ohne Filter), Beschleunigung  $a$

auch beim Stillstand des Probanden nicht exakt auf Null sinkt, sondern teilweise leicht darüber bleibt. Dies ist mit der hohen Empfangsempfindlichkeit des Systems zu begründen, sodass Reflexionen der GPS-Signale hier als geringe Geschwindigkeitswerte auftreten können.

#### 4.4.2 Filterung und Berechnung der Beschleunigung

Da das Geschwindigkeitssignal (vergleiche Abbildung 4.5) durch die Position der Antenne auf der Schulter der Probanden schwankt und sich diese Schwankung auf eine abgeleitete Beschleunigung auswirken würde, muss das Signal gefiltert werden. Hierzu wurde ein „Butterworth“ Tiefpassfilter benutzt und anschließend die Phasenverschiebung korrigiert. Aus dem gefilterten Geschwindigkeitssignal kann durch einfache zeitliche Ableitung die Beschleunigung bestimmt werden. Abbildung 4.6 zeigt eine Messung, bei der ein Proband gebeten wurde, zunächst normal zu gehen, dann ins Laufen zu beschleunigen und danach so schnell wie möglich zu rennen. Das gefilterte Geschwindigkeitssignal (in schwarz) verläuft deutlich ruhiger als das Rohsignal. Es sind zwar leichte Schwankungen zu erkennen, die auch in der abgeleiteten Beschleunigung (in blau) sichtbar sind, jedoch ist die Amplitude dieser Schwankungen in der Beschleunigung gering, sodass die relevanten Beschleunigungsverläufe während der Übergänge eindeutig identifiziert werden können.



### 4.4.3 Bestimmung der Mean Uniform Acceleration

Die Beschleunigungsverläufe in einem definierten Übergang werden zunächst für jeden Probanden separat betrachtet, bevor sie im nächsten Abschnitt zu mittleren Beschleunigungsvermögen zusammengefasst werden.

In der Folge beschreibe dazu ein *Beschleunigungsprozess*  $a(t)$  den Verlauf der Beschleunigung während eines definierten Übergangs. Dabei wird  $a$  so gewählt, dass für  $T > 0$  und  $t \in [0, T]$  gilt

$$a(0) = a(T) = 0 \quad (4.1)$$

sowie

$$a(t) \neq 0, \text{ für } 0 < t < T. \quad (4.2)$$

Das bedeutet,  $a(t)$  beschreibt die Beschleunigung während des Übergangs zweier oben definierter Zustände, zum Beispiel den Übergang vom Stehen zum Gehen. Dabei werden die Anfangs- und Endzeit gemäß (4.1) und (4.2) definiert.<sup>36</sup>

Für einen Probanden  $i$  und Wiederholung  $j$  sei nun  $a_{ij}(t)$ ,  $t \in [0, T_{ij}]$  der Beschleunigungsprozess in einem Übergang. Des Weiteren wird  $k_i$  als die Wiederholung definiert, welche den schnellsten Peak<sup>37</sup> in der Beschleunigung aufweist, d. h.

$$k_i := \arg \min_j (\arg \max_t (a_{ij}(t))), \quad (4.3)$$

bzw. für einen negativen Übergang (Verzögerung)

$$k_i := \arg \min_j (\arg \min_t (a_{ij}(t))). \quad (4.4)$$

Damit ist  $a_{ik_i}$  der Beschleunigungsprozess, bei dem Proband  $i$  die Peak-Beschleunigung am schnellsten erreicht hat.<sup>38</sup> Abbildung 4.7 zeigt zur Veranschaulichung alle Wiederholungen eines Probanden beim Übergang vom Stehen zum Rennen, wobei  $a_{ik_i}$  in rot hervorgehoben ist. Es fällt auf, dass sich die Beschleunigungsprozesse teilweise stark unterscheiden, insbesondere in der Dauer bis zum jeweiligen Peak. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass durch die angesprochenen schwachen Schwankungen im Signal die Bedingungen (4.1) und (4.2) bereits erfüllt sind, obwohl der eigentliche Beschleunigungsübergang noch nicht begonnen hat. Um dadurch die Ergebnisse nicht zu verfälschen, werden die Wiederholungen  $a_{ij}$ ,  $j \neq k_i$  vor der weiteren Auswertung modifiziert.

<sup>36</sup>Diese Definition macht zwar eine spätere Normierung erforderlich, eine alternative Definition würde jedoch dazu führen, dass die Prozesse nicht im Nullpunkt beginnen.

<sup>37</sup>Der Beschleunigungs-Peak meint das eindeutige Maximum (oder Minimum bei einer Verzögerung) eines Beschleunigungsprozesses.

<sup>38</sup>Definition (4.3) sagt nichts über die Höhe des Peaks aus.

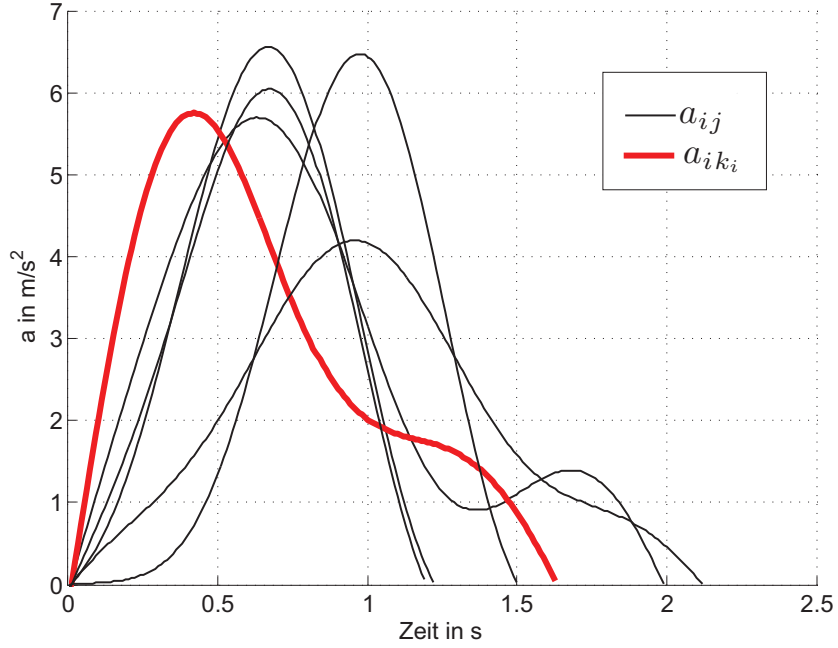


Abbildung 4.7: Beschleunigungsprozesse  $a_{ij}$  eines Probanden für den Übergang vom Stehen zum Rennen

## Normierung

Um die Prozesse zeitlich zu verschieben und sie damit zu normieren, wurde in (4.3) bzw. (4.4) die Wiederholung mit dem schnellsten Peak definiert. Die Verschiebung erfolgt so, dass der Peak aller Wiederholungen zur Zeit des schnellsten Peaks eintritt. Dies verfälscht die Ergebnisse zwar ebenso wie die angesprochenen Schwankungen, jedoch findet hier tendenziell wieder eine Überschätzung der Bewegungsmöglichkeiten statt.<sup>39</sup> Für die Definition der modifizierten Beschleunigungsprozesse  $\tilde{a}_{ij}$  sei zunächst

$$\tau_j^+ := \arg \max_t (a_{ij}(t)), \quad (4.5)$$

für einen positiven Beschleunigungsprozess und

$$\tau_j^- := \arg \min_t (a_{ij}(t)) \quad (4.6)$$

für einen negativen Beschleunigungsprozess. Dabei entspricht  $\tau_j^\pm$  der Zeit des jeweiligen Peaks des Prozesses  $a_{ij}$ . Mit (4.5) kann  $\tilde{a}_{ij}$  für einen positiven Prozess wie folgt definiert werden:

$$\tilde{a}_{ij}(t) := \begin{cases} t \frac{\max_\theta (a_{ij}(\theta))}{\tau_{k_i}^+} & \text{für } t \in [0, \tau_{k_i}^+] \\ a_{ij}(t - \tau_{k_i}^+ + \tau_j^+) & \text{für } t > \tau_{k_i}^+. \end{cases} \quad (4.7)$$

<sup>39</sup>Zusätzlich zu den in Abschnitt 4.3.1 geschilderten.

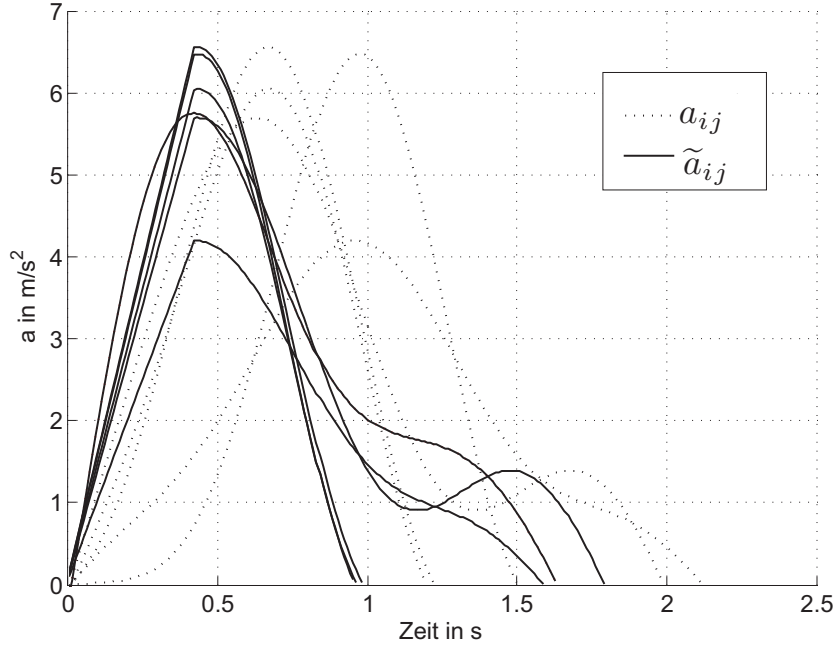


Abbildung 4.8: Modifizierte Beschleunigungsprozesse  $\tilde{a}_{ij}$  eines Probanden für den Übergang vom Stehen zum Rennen

Für einen negativen Prozess ergibt sich entsprechend

$$\tilde{a}_{ij}(t) := \begin{cases} t \frac{\min_{\theta}(a_{ij}(\theta))}{\tau_{k_i}^-} & \text{für } t \in [0, \tau_{k_i}^-] \\ a_{ij}(t - \tau_{k_i} + \tau_j) & \text{für } t > \tau_{k_i}^- \end{cases} \quad (4.8)$$

Die Prozesse  $\tilde{a}_{ij}$  weisen nun für alle Wiederholungen  $j$  den Peak zur selben Zeit auf. Dafür wurde der Verlauf bis zum Peak entsprechend linearisiert, damit die Prozesse immer noch  $\tilde{a}_{ij}(0) = 0$  erfüllen. Der Definitionsbereich für Prozess  $\tilde{a}_{ij}(t)$  verändert sich entsprechend zu  $t \in [0, \tilde{T}_{ij}]$  mit

$$\tilde{T}_{ij} = T_{ij} - \tau_{k_i}^{\pm}. \quad (4.9)$$

Abbildung 4.8 zeigt die entsprechenden Prozesse  $\tilde{a}_{ij}$  der ursprünglichen Prozesse  $a_{ij}$  aus Abbildung 4.7. Die Modifizierung der Prozesse stellt sicher, dass es durch die Schwankungen im Signal nicht zu einer Unterschätzung der Bewegungsmöglichkeiten durch sehr langsam ansteigende Prozesse kommt.

Die Beschleunigungsprozesse in dieser Form sind bereits aussagekräftig, was zum Beispiel die Höhe des Peaks anbelangt, welche deutlich unterhalb von  $9,81 \text{ m/s}^2$  liegen. Für die Bewertung der Durchführbarkeit der Trajektorien, wie sie in Kapitel 3 berechnet wurden, wird jedoch eine andere Form zur Darstellung der Beschleunigungsmöglichkeiten benutzt.

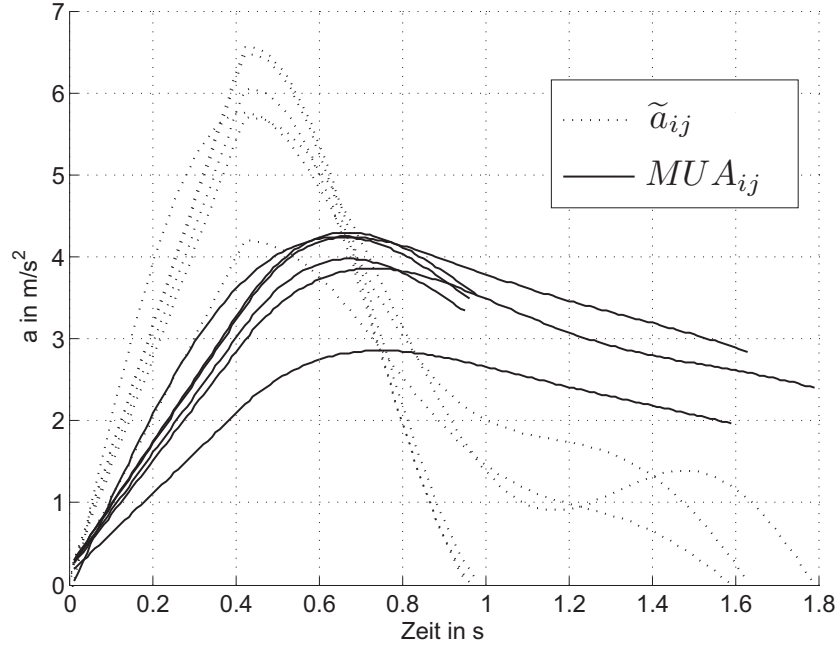


Abbildung 4.9: Mean Uniform Acceleration eines Probanden für den Übergang vom Stehen zum Rennen

Die *Mean Uniform Acceleration*, (*MUA*) wird dazu wie folgt definiert:

$$MUA_{ij}(t) := \begin{cases} 0 & \text{für } t = 0, \\ t^{-1} \int_0^t \tilde{a}_{ij}(\theta) d\theta & \text{für } t \in (0, \tilde{T}_{ij}]. \end{cases} \quad (4.10)$$

Der Wert  $MUA_{ij}(t)$  beschreibt die mittlere Beschleunigung, welche konstant im Intervall  $[0, t]$  aufgebracht werden kann, wenn der Beschleunigungsprozess  $\tilde{a}_{ij}$  zugrunde liegt. Mittels der *MUA* ist es möglich, die Beschleunigungswerte, welche in Kapitel 3 berechnet wurden, direkt zu bewerten, da die Werte aus Kapitel 3 ebenfalls mit der Annahme der konstanten Beschleunigung berechnet wurden.<sup>40</sup> Des Weiteren können diese Werte auch direkt mit den aus der Literatur bekannten Annahmen über die mögliche Fußgängerbeschleunigung verglichen werden. In Abbildung 4.9 sind die  $MUA_{ij}$  zu den  $\tilde{a}_{ij}$  aus Abbildung 4.8 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte der  $MUA_{ij}$  deutlich unterhalb der vorigen Beschleunigungswerte liegen, da es sich nun um die Beschleunigung handelt, die konstant in einem bestimmten Zeitintervall aufgebracht werden kann.

#### 4.4.4 Bestimmung der mittleren Bewegungsmöglichkeiten

Für die Ermittlung eines mittleren Beschleunigungsvermögens aller Probanden muss zunächst ein mittleres Beschleunigungsvermögen für jeden Probanden berechnet werden.

<sup>40</sup>Eine direkte Verwendung der Verläufe  $\tilde{a}$  in Kapitel 3 würde den Aufwand und damit auch die Rechenzeit erheblich steigern.

Zu diesem Zweck wurden die  $MUA$  Kurven durch eine stückweise lineare Funktion angenähert. Wie in Abbildung 4.9 deutlich wird, können die  $MUA$  Kurven gut durch einen linearen Anstieg bis zum jeweiligen Peak und einem anschließenden, annähernd linearen Abflachen charakterisiert werden. Dazu sei für  $P = (p_1, p_2)^T \in \mathbb{R}^2$  und  $Q = (q_1, q_2)^T \in \mathbb{R}^2$  die Funktion  $LM_{P,Q}(t)$  wie folgt definiert:

$$LM_{P,Q}(t) := \begin{cases} t \frac{p_2}{p_1} & \text{für } t \in [0, p_1], \\ (t - p_1) \frac{(q_2 - p_2)}{q_1 - p_1} + p_2 & \text{für } t > p_1. \end{cases} \quad (4.11)$$

Die beiden Punkte  $P, Q$  definieren damit die stückweise lineare Funktion  $LM$ , welche in der Folge benutzt wird, um die verschiedenen  $MUA_{ij}$  eines Probanden in einem Übergang zu approximieren. Die Bestimmung der Punkte  $P$  und  $Q$  geschieht dabei über die Methode der *kleinsten Fehlerquadrate*. Sei  $n_i$  die Anzahl der Wiederholungen im betrachteten Übergang von Proband  $i$  sowie

$$T_i^0 = \min_j (\tilde{T}_{ij}). \quad (4.12)$$

Mit (4.12) werden  $P^*, Q^*$  durch das folgende Optimierungsproblem bestimmt:

$$(P^*, Q^*) = \arg \min_{(P,Q)} \left( \sum_{j=1}^{n_i} \int_0^{T_i^0} (LM_{P,Q}(t) - MUA_{ij}(t))^2 dt \right), \quad (4.13)$$

unter den Nebenbedingungen,

$$p_1^* < q_1^*, \quad (4.14)$$

$$|q_2^*| < |p_2^*|, \quad (4.15)$$

$$\min_j \max_t |MUA_{ij}(t)| \leq |p_2^*| \leq \max_j \max_t |MUA_{ij}(t)|. \quad (4.16)$$

Die Nebenbedingungen (4.14) bis (4.16) stellen hierbei sicher, dass die zur Lösung gehörende  $LM$  Kurve im Peak zwischen den verschiedenen  $MUA_{ij}$  verläuft sowie nach dem Peak abfällt. Man beachte, dass die Lösung für  $Q^*$  nicht eindeutig ist, da für einen Punkt  $Q^*$ , welcher das Optimierungsproblem löst, beliebige weitere Punkte auf dem Halbstrahl definiert durch  $P^*, Q^*$  zum selben Verlauf von  $LM_{P,Q}$  führen. In der Folge sei demnach  $Q^*$  einer der Punkte, welcher die Bedingungen erfüllt. Für  $T_i^u = \max_j (\tilde{T}_{ij})$  und  $t \in [0, T_i^u]$  sei dann

$$MUA_i^{av}(t) := LM_{P^*, Q^*}(t). \quad (4.17)$$

$MUA_i^{av}$  repräsentiert somit das Beschleunigungsvermögen von Proband  $i$  im betrachteten Übergang. Der maximale Zeitpunkt  $T_i^u$ , für den die Funktion noch definiert ist, stellt erneut eine Überschätzung der Bewegungsmöglichkeiten dar, da  $T_i^u$  der maximale Endzeitpunkt aller Beschleunigungsprozesse von Proband  $i$  ist. Abbildung 4.10 zeigt die

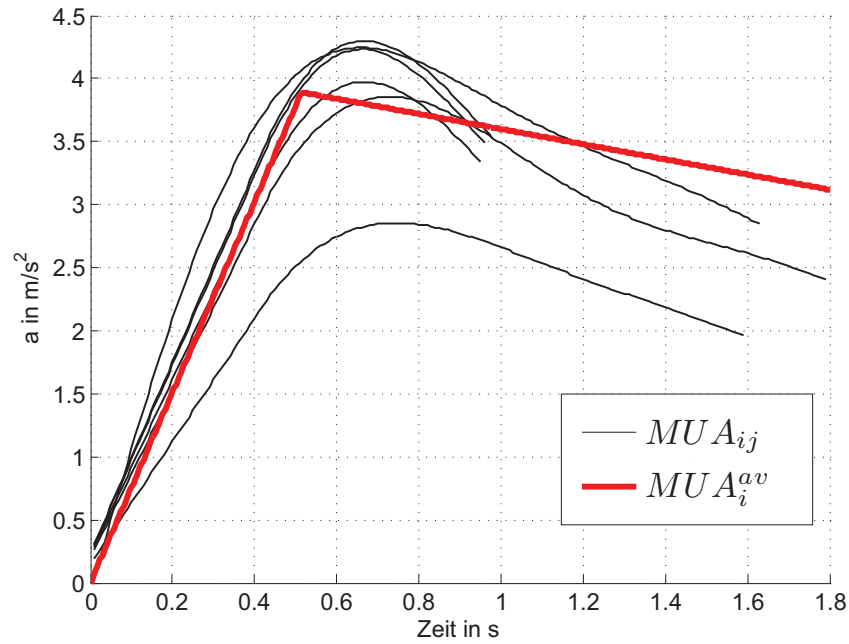


Abbildung 4.10: Mean Uniform Acceleration average eines Probanden für den Übergang vom Stehen zum Rennen

$MUA_i^{av}$  und die  $MUA_{ij}$  zu den Beschleunigungsprozessen aus den vorigen Abbildungen. Im nächsten Schritt werden die verschiedenen  $MUA_i^{av}$  der Probanden durch das gleiche Verfahren wie in (4.13) bis (4.16) zu einer  $MUA^{av}$  zusammengefasst. Der Definitionsbereich für  $MUA^{av}$  ergibt sich mit  $T^u = \max_i(T_i^u)$  zu  $t \in [0, T^u]$ . Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der Übergang von  $MUA_{ij}^{av}$  zu  $MUA_i^{av}$  und schließlich zu  $MUA^{av}$  in diesem Fall keiner weiteren Überschätzung, sondern einer Mittelung entspricht. Es wurde eingangs erwähnt, dass dort, wo es nötig ist Modifikationen vorzunehmen, entsprechende Überschätzungen benutzt werden. In diesem Fall erschien jedoch eine Mittelung sinnvoller, da sonst der Funktionsnutzen zum größten Teil nur durch den sportlichsten der Probanden bestimmt würde.

Zur Veranschaulichung sind in Abbildung 4.11 die verschiedenen  $MUA_i^{av}$  aller Probanden für den Übergang vom Stehen zum Rennen dargestellt sowie die  $MUA^{av}$  als Durchschnitt aller Probanden (in rot hervorgehoben). Die approximierten  $MUA^{av}$  und  $MUA_i^{av}$  Kurven sind hier in einem Intervall bis maximal drei Sekunden aufgetragen, in der Situationsanalyse wird die Kennlinie  $MUA^{av}$  bis zum tatsächlichen Wert für  $T^u$  benutzt (siehe Abschnitt 4.6).<sup>41</sup> Es zeigt sich, dass die  $MUA_i^{av}$  Kurven der Probanden für den Übergang vom Stehen zum Rennen teilweise sehr unterschiedlich sind. Der höchste Peak liegt bei knapp über  $4 \text{ m/s}^2$ , während der geringste Peak gerade einmal knapp über  $1,5 \text{ m/s}^2$  beträgt. Im Mittel ergibt sich der Peak der  $MUA^{av}$  zu knapp unter  $3 \text{ m/s}^2$ . Dieses Ergeb-

<sup>41</sup>Für die negativen Übergänge, die positiven werden bis zu einer Maximalzeit ausgewertet, da sonst die Bewegungsmöglichkeiten unterschätzt werden könnten.

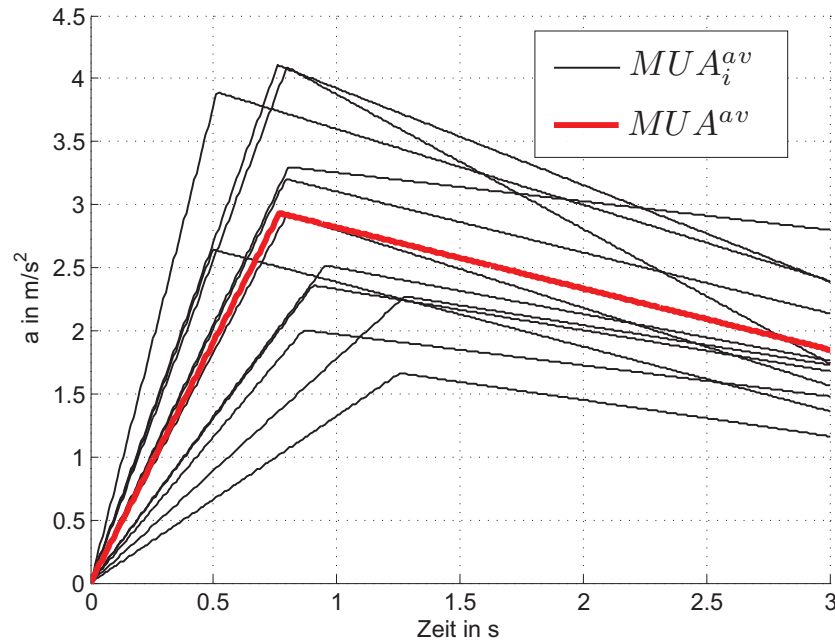


Abbildung 4.11: Mean Uniform Acceleration average aller Probanden für den Übergang vom Stehen zum Rennen

nis sowie die Ergebnisse der übrigen Übergänge werden im nächsten Abschnitt vorgestellt und näher erläutert.

## 4.5 Ergebnisse

Das im vorigen Abschnitt aufgezeigte Verfahren wurde für alle zwölf definierten Übergänge (siehe Abschnitt 4.2) durchgeführt und die entsprechenden  $MUA^{av}$  Kurven ermittelt. Diese werden zusammen mit den jeweils maximalen modifizierten Beschleunigungsprozessen der Probanden hier vorgestellt und die Ergebnisse interpretiert.

### 4.5.1 Positive Übergänge

In den Abbildungen 4.12 bis 4.17 sind jeweils links die modifizierten Beschleunigungsprozesse der Probanden mit dem maximalen (im Betrag) Peak für den entsprechenden Übergang aufgetragen. Auf der rechten Seite sind sowohl die  $MUA_i^{av}$  (schwarz) als auch die  $MUA^{av}$  (rot, gestrichelt) für den Übergang dargestellt. Beim Übergang vom Stehen zum Gehen wurden erwartungsgemäß relativ geringe Beschleunigungswerte erreicht. Die maximalen Peaks in der Beschleunigung reichen von knapp unter  $1,5 \text{ m/s}^2$  bis etwa  $2,2 \text{ m/s}^2$ . Der Peak der später benutzten Kennlinie  $MUA^{av}$  für alle Probanden liegt nur knapp oberhalb von  $1 \text{ m/s}^2$ .

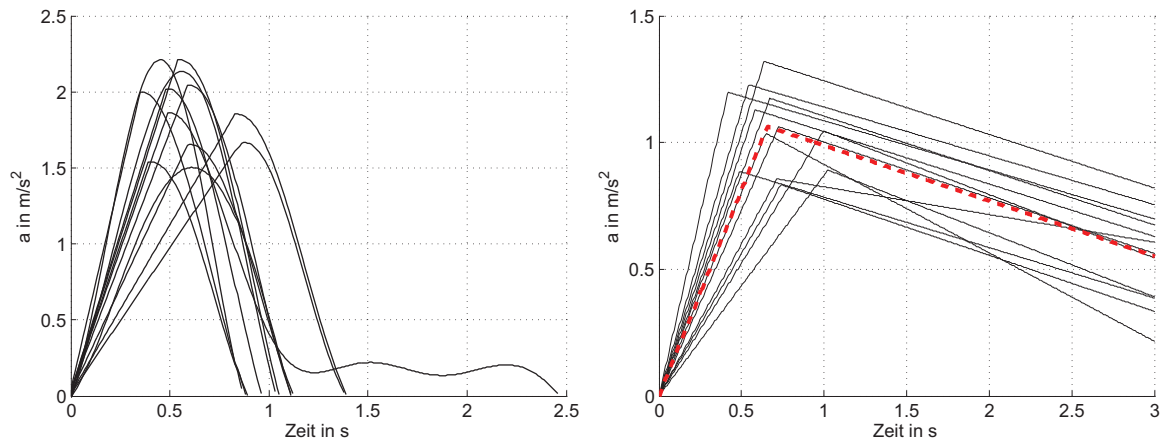


Abbildung 4.12: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Stehen zum Gehen

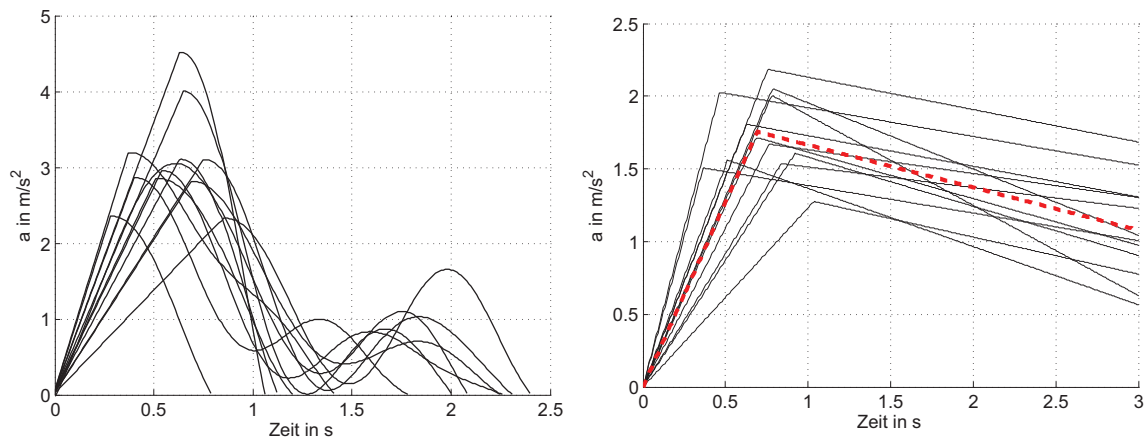


Abbildung 4.13: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Stehen zum Laufen

Die Ergebnisse des Übergangs vom Stehen zum Laufen (Abbildung 4.13) liegen bereits deutlich höher. Der maximale Peak beträgt hier  $2,5 \text{ m/s}^2$  bis  $4,5 \text{ m/s}^2$  und schwankt damit innerhalb der Probandengruppe deutlich stärker als beim Übergang vom Stehen zum Gehen. Die Ursache dafür liegt auch in der unterschiedlichen Geschwindigkeit, mit der die Probanden den Zustand „Laufen“ assoziieren. Die  $MUA^{av}$  verläuft entsprechend ebenfalls deutlich höher als im vorigen Übergang, der Peak liegt bei etwa  $1,75 \text{ m/s}^2$ . Die Zeit des Peaks (und damit das Ende des ersten „Rucks“<sup>42</sup>) schwankt unter den Probanden stärker als zuvor, liegt im Mittel aber ähnlich zum vorigen Übergang.

Der Übergang vom Stehen zum Rennen weist wie erwartet die höchsten Beschleunigungswerte im Test auf (Abbildung 4.14). Die maximalen Peaks der Probanden schwanken hierbei sehr stark zwischen knapp über  $3 \text{ m/s}^2$  bis zum höchsten Wert im gesamten Test von  $7,2 \text{ m/s}^2$ , was hauptsächlich an den unterschiedlichen physischen Fähigkeiten der

<sup>42</sup>Der physikalische Ruck (die Ableitung der Beschleunigung) weist hier einen Vorzeichenwechsel von positiv zu negativ auf.



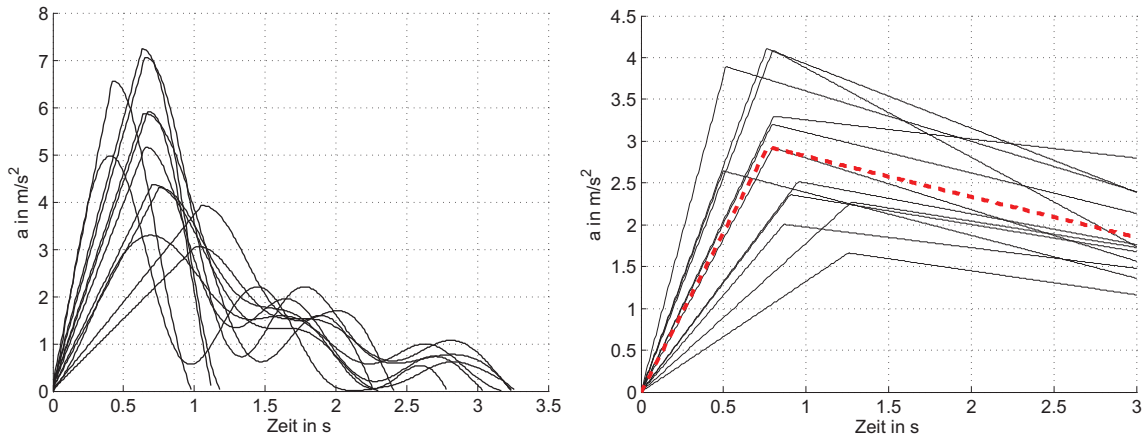


Abbildung 4.14: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Stehen zum Rennen

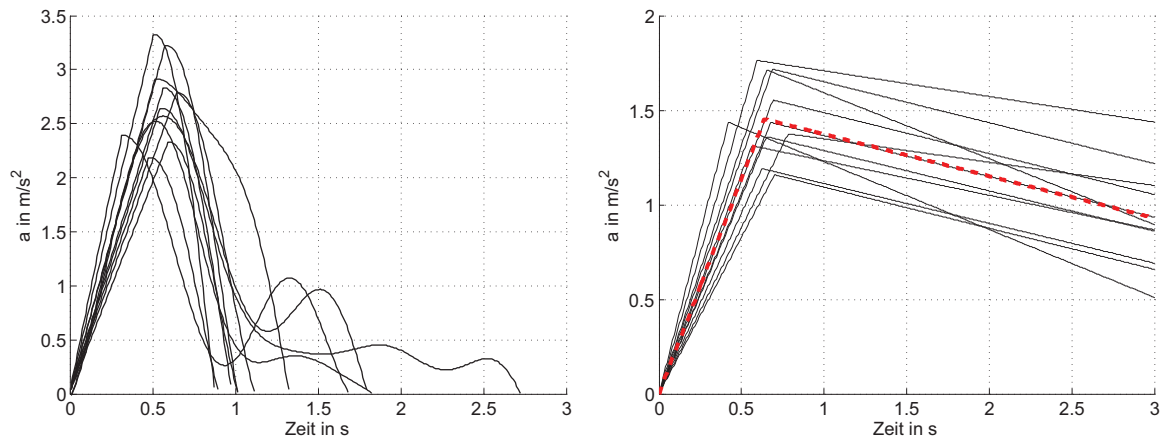


Abbildung 4.15: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Gehen zum Laufen

Probanden liegt. Bemerkenswert ist, dass selbst im Peak-Wert die Beschleunigung von  $9,81 \text{ m/s}^2$  nicht erreicht wird.<sup>43</sup> Das Maximum der  $MUA_i^{av}$  liegt entsprechend „nur“ knapp oberhalb von  $4 \text{ m/s}^2$ , im Schnitt ergibt sich bei der  $MUA^{av}$  hierfür ein Wert von knapp unterhalb von  $3 \text{ m/s}^2$ , was weniger als einem Drittel der Annahmen aus (Fuerstenberg 2005) entspricht.

Abbildung 4.15 zeigt die Ergebnisse des Übergangs vom Gehen zum Laufen.<sup>44</sup> Es wird deutlich, dass der bisherige Bewegungszustand einen entscheidenden Einfluss auf die Beschleunigung hat. Da die Probanden zur Erreichung des Zustands Laufen aus dem Zustand Gehen weniger beschleunigen müssen als aus dem Zustand Stehen, liegen die maximalen modifizierten Beschleunigungsprozesse deutlich niedriger als in Abbildung 4.13. Dies trifft ebenso für die  $MUA^{av}$  Kurve zu, deren Peak etwa  $0,3 \text{ m/s}^2$  niedriger liegt.

<sup>43</sup>Der Wert, welcher beispielsweise in (Fuerstenberg 2005) als Überschätzung benutzt wird.

<sup>44</sup>In diesem Fall nur von elf der zwölf Probanden, da die Prozesse eines Probanden alle auffällig verzögert auftraten. Dies deutet auf einen kurzzeitigen technischen Defekt hin.

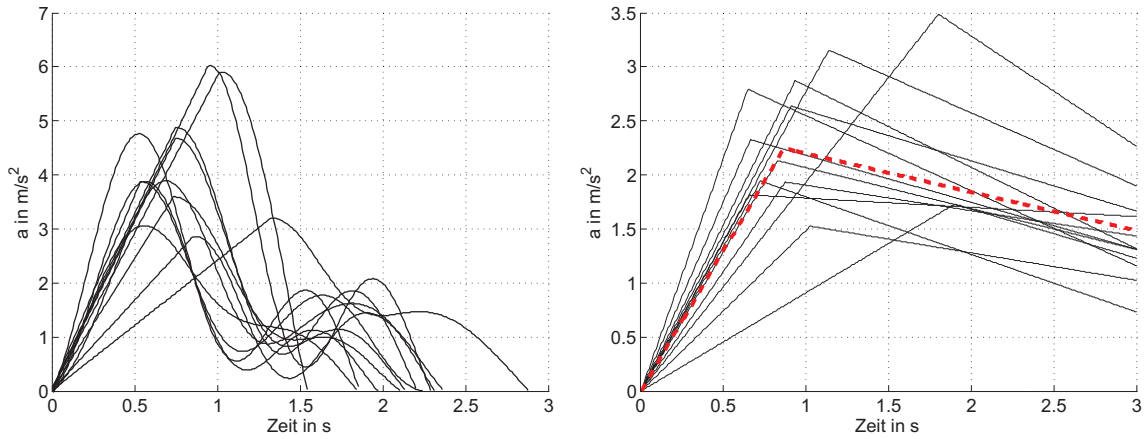


Abbildung 4.16: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Gehen zum Rennen

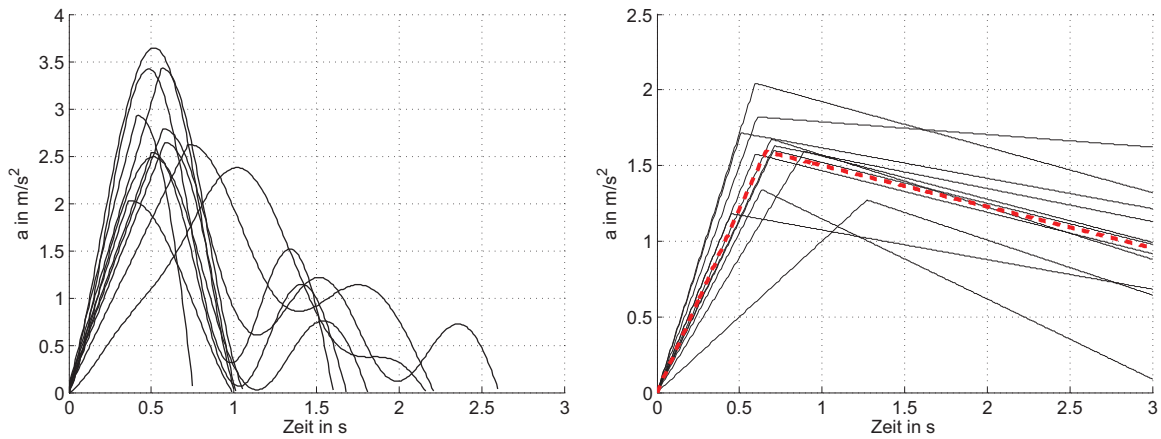


Abbildung 4.17: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Laufen zum Rennen

Die maximale Beschleunigung aus dem Zustand Gehen (der Übergang vom Gehen zum Rennen) ist in Abbildung 4.16 dargestellt. Hier zeigt sich im Vergleich mit den Ergebnissen des Übergangs vom Stehen zum Rennen, dass die maximalen Beschleunigungsmöglichkeiten der Probanden deutlich sinken, wenn sie sich vorher bereits im bewegten Zustand befanden. Es ist weiterhin eine starke Schwankung der Beschleunigungs-Peaks der Probanden zu beobachten, das Niveau ist jedoch insgesamt niedriger. Der maximal erreichte Peak liegt nun bei  $6 \text{ m/s}^2$  und damit  $1,2 \text{ m/s}^2$  niedriger als aus dem Stand. Der Peak der  $MUA^{av}$  sinkt im Vergleich um  $0,75 \text{ m/s}^2$  auf  $2,25 \text{ m/s}^2$  und wird zusätzlich erst knapp 100 ms später erreicht.

Dies kann einen deutlichen Einfluss auf das Ergebnis der Situationsanalyse haben, insbesondere, da die wenigsten Fußgänger vor einer Kollision unbewegt waren (siehe auch Abbildung 4.2), sodass die maximale Beschleunigung aus dem Übergang vom Stehen zum Rennen nicht zur Bewertung der Trajektorien benutzt werden kann. Dieser Einfluss zeigt sich noch einmal deutlicher in den Ergebnissen des Übergangs vom Laufen zum Rennen

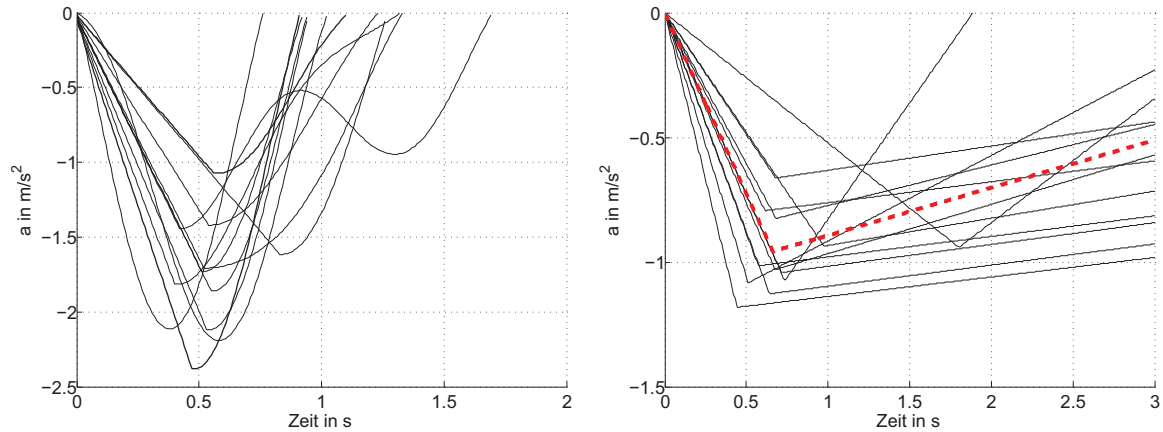


Abbildung 4.18: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Gehen zum Stehen komfortabel

(Abbildung 4.17). Hier liegt der Peak der  $MUA^{av}$  Kurve bei  $1,6 \text{ m/s}^2$  und damit knapp oberhalb der Hälfte des Peaks der entsprechenden Kurve beim Übergang vom Stehen zum Rennen.

## 4.5.2 Negative Übergänge

Entsprechend den in Abschnitt 4.5.1 gewonnenen Ergebnissen für die Beschleunigung in die bisherige Bewegungsrichtung der Probanden werden hier die Ergebnisse für die Übergänge mit Beschleunigung entgegen der bisherigen Bewegungsrichtung präsentiert.

Die Probanden wurden, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, aufgefordert, aus den verschiedenen Bewegungszuständen auf zweierlei Weise zum Stehen zu kommen. Zunächst sollten die Probanden komfortabel und ohne externes Signal anhalten (im Folgenden als komfortabel bezeichnet), anschließend auf einen Zuruf hin so schnell es ihnen möglich war (maximal).

Abbildung 4.18 zeigt die Resultate für den Übergang vom Gehen zum Stehen (komfortabel). Die hierbei auftretenden Verzögerungswerte sind mit denen des Übergangs vom Stehen zum Gehen vergleichbar. Allerdings ergeben sich etwas höhere Schwankungen in den maximalen (im Betrag) Peaks der einzelnen Probanden. Ein Grund hierfür ist sicherlich die unterschiedliche Interpretation des Begriffs komfortabel bei den verschiedenen Probanden. Im Mittel ist der Verlauf der  $MUA^{av}$  jedoch durchaus ähnlich zum Verlauf beim Übergang vom Stehen zum Gehen, die Peak-Verzögerung fällt hier im Betrag nur leicht geringer aus. Deutlich höhere Verzögerungswerte werden im Übergang vom Gehen zum Stehen (maximal) erreicht (Abbildung 4.19). Die maximal auftretende Verzögerung liegt hier bei knapp  $-3 \text{ m/s}^2$  und damit etwa  $0,5 \text{ m/s}^2$  niedriger als beim komfortablen Übergang. Eine ähnliche Differenz ergibt sich im Mittel für die  $MUA^{av}$  Kurve, da die Schwankungen der maximalen Prozesse der Probanden hier geringer ausfallen. Es fällt

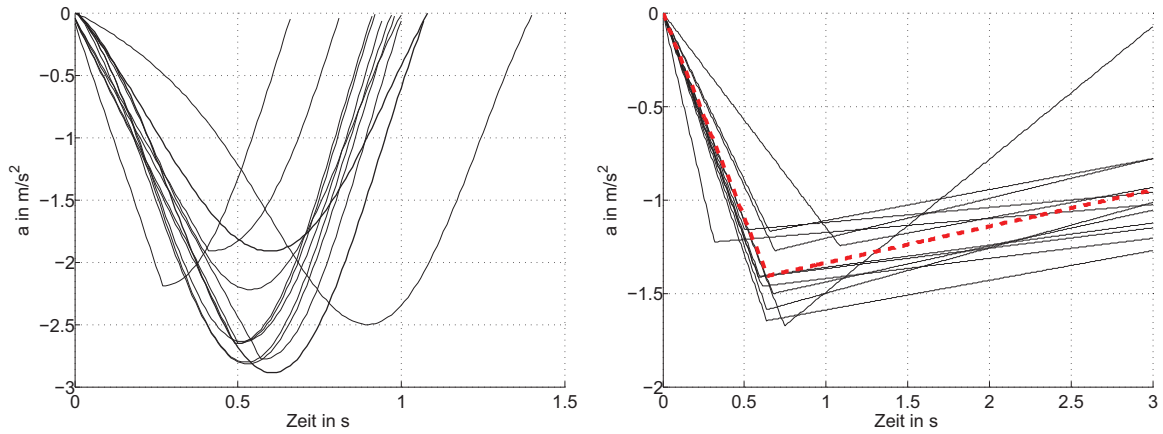


Abbildung 4.19: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Gehen zum Stehen maximal

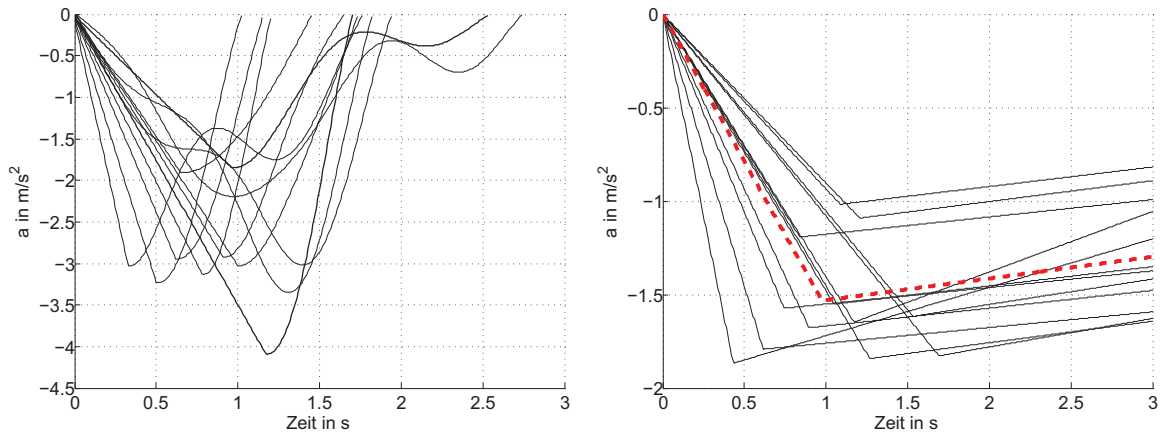


Abbildung 4.20: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Laufen zum Stehen komfortabel

weiterhin auf, dass der Peak der  $MUA^{av}$  kaum früher erreicht wird als im komfortablen Fall, was allerdings teilweise auch an der Überschätzung durch die Modifikation der Beschleunigungsprozesse liegt.

Abbildung 4.20 stellt die Ergebnisse des Übergangs vom Laufen zum Stehen (komfortabel) dar. Die Verzögerungswerte liegen im Betrag in ähnlicher Höhe wie beim Übergang vom Stehen zum Laufen, sowohl bei den einzelnen maximalen Prozessen der Probanden als auch bei der  $MUA^{av}$  im Mittel. Hier liegt die Peak Verzögerung bei ca.  $-1,5 \text{ m/s}^2$  und damit knapp unterhalb der Peak Verzögerung der  $MUA^{av}$  des Übergangs vom Gehen zum Stehen (maximal). D.h. obwohl die Probanden hier komfortabel anhalten sollten, wird eine betragsmäßig höhere Verzögerung aufgebaut. Die Verzögerung im Übergang vom Laufen zum Stehen (maximal) ist erwartungsgemäß noch einmal deutlich höher (Abbildung 4.21). Die einzelnen Verzögerungswerte reichen hier bis fast  $-6 \text{ m/s}^2$ , der Peak der  $MUA^{av}$  liegt bei  $-2,7 \text{ m/s}^2$ . Erwartungsgemäß sind die Beschleunigungsprozesse hier kürzer als im komfortablen Fall, da etwa die gleiche Geschwindigkeit mit höherer

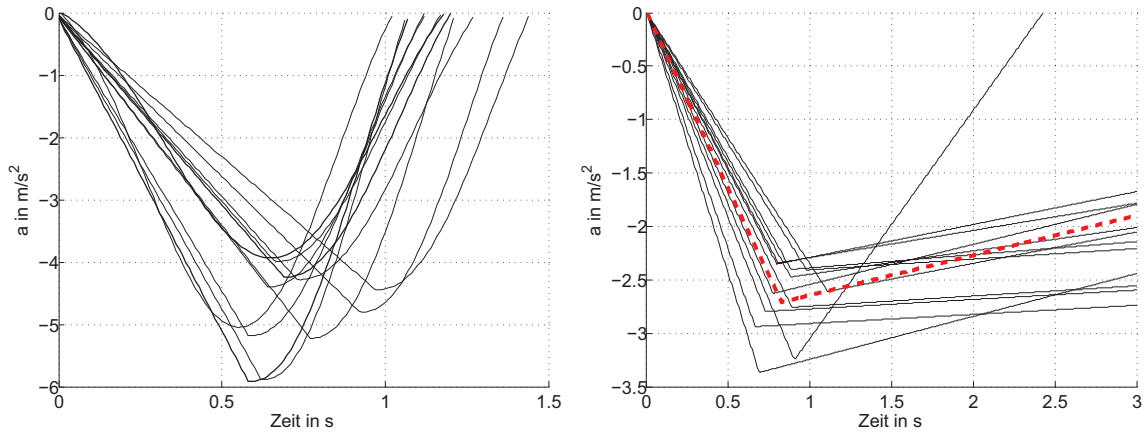


Abbildung 4.21: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Laufen zum Stehen maximal

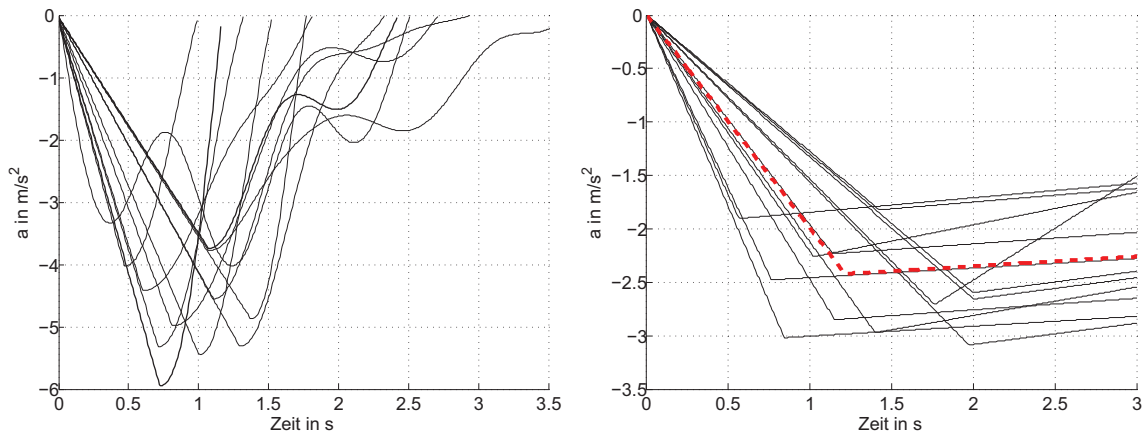


Abbildung 4.22: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Rennen zum Stehen komfortabel

Verzögerung abgebaut wird. Der längste Beschleunigungsprozess im maximalen Fall liegt bei unter 1,5 s während im komfortablen Fall vereinzelt über 2,5 s vergangen.

Ähnliche Werte zur maximalen Verzögerung ergeben sich im Übergang vom Rennen zum Stehen (komfortabel), welcher in Abbildung 4.22 dargestellt ist. Der Peak der  $MUA^{av}$  liegt im Betrag sogar etwas niedriger als der im Übergang vom Laufen zum Rennen (maximal), nämlich bei knapp  $-2,5 \text{ m/s}^2$ . Die maximalen Verzögerungswerte reichen von  $-3,7 \text{ m/s}^2$  bis zu  $-6 \text{ m/s}^2$  und sind damit im Vergleich zu den Werten des Übergangs vom Stehen zum Rennen etwas geringer.

Die Ergebnisse des letzten betrachteten Übergangs vom Rennen zum Stehen (maximal) sind in Abbildung 4.23 dargestellt. Hier werden die betragsmäßig höchsten Verzögerungswerte erreicht. Diese liegen in den maximalen Peaks ungefähr auf dem Niveau im Übergang vom Stehen zum Rennen, in dem die höchsten (positiven) Beschleunigungswerte erzielt wurden. Der Peak der  $MUA^{av}$  liegt mit  $-3,2 \text{ m/s}^2$  ebenfalls auf einem vergleichbaren Niveau.

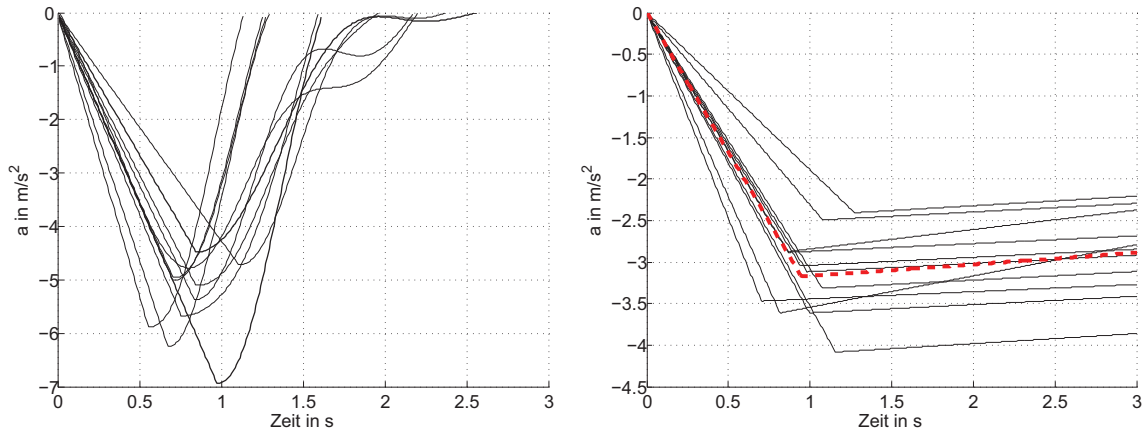


Abbildung 4.23: Maximale modifizierte Beschleunigungsprozesse (links) und  $MUA_i^{av}$ ,  $MUA^{av}$  für den Übergang vom Rennen zum Stehen maximal

### 4.5.3 Fazit

Die dargelegten Ergebnisse zeigen, dass die Faktoren *Zeit*, *Geschwindigkeit* und *Bewegungsrichtung* einen großen Einfluss auf die mögliche Beschleunigung der Probanden haben. Dies lässt sich in den oben dargestellten Ergebnissen deutlich erkennen. Insbesondere die Abhängigkeit von dem bisherigen Bewegungszustand (der Geschwindigkeit) verdeutlicht, dass eine solche Differenzierung einen hohen Einfluss auf die zu treffenden Annahmen über maximale oder auch komfortable Beschleunigungsmöglichkeiten hat.

Die maximalen Beschleunigungs- und Verzögerungswerte wurden wie erwartet beim Übergang in den Zustand Rennen bzw. aus dem Zustand Rennen erreicht. Diese lagen im höchsten Peak jeweils bei etwa  $7 \text{ m/s}^2$  (im Betrag) und damit bereits deutlich unter der Annahme (aus Fuerstenberg 2005) von  $9,81 \text{ m/s}^2$ . In der gemittelten Beschleunigung, welche direkt mit dieser Annahme vergleichbar ist (da es sich um konstant aufzubringende Beschleunigung handelt), lagen die maximalen Peaks der  $MUA_i^{av}$  bei etwa  $4 \text{ m/s}^2$  und im Schnitt über alle Probanden bei  $3 \text{ m/s}^2$ . Dies sind die Beschleunigungswerte im günstigsten Fall, d. h. bei positiver Beschleunigung ausgehend von einem stehenden Fußgänger, bei negativer Beschleunigung ausgehend von einem rennenden Fußgänger. Im (unfallstatistisch) wesentlich relevanteren Fall des bewegten Fußgängers sinken die Peaks der positiven Beschleunigungsmöglichkeiten auf im Mittel  $2,25 \text{ m/s}^2$  (aus dem Gehen) bzw.  $1,6 \text{ m/s}^2$  (aus dem Laufen). Zum Vergleich sind in Abbildung 4.24 die  $MUA^{av}$  Kurven der verschiedenen positiven Übergänge noch einmal dargestellt (die Reihenfolge in der Legende von oben nach unten entspricht der Höhe der Peaks). Die Übergänge, bei denen die Probanden nicht maximal beschleunigen mussten (Übergänge zu Gehen und zu Laufen), werden in der Situationsanalyse als komfortablere Übergänge betrachtet. Beachtlich ist dabei, dass der Peak des Übergangs vom Stehen zum Laufen (ca.  $1,75 \text{ m/s}^2$ ) oberhalb des Peaks der Maximalbeschleunigung aus dem Laufen heraus liegt. Dies zeigt noch ein-

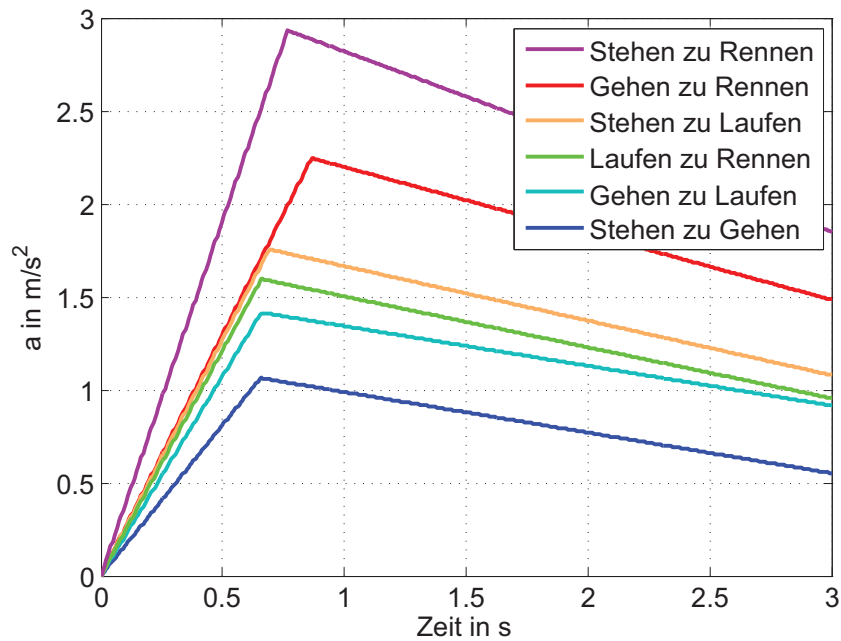


Abbildung 4.24:  $MUA^{av}$  für alle positiven Übergänge

mal sehr deutlich die Abhängigkeit der Beschleunigung vom aktuellen Bewegungszustand des Fußgängers.

Die  $MUA^{av}$  für die negativen Übergänge sind in Abbildung 4.25 noch einmal zusammengefasst (die Reihenfolge in der Legende von oben nach unten entspricht der Höhe der Peaks). Die höchste Verzögerung im Mittel wird aus der höchsten Geschwindigkeit (Rennen) bei maximaler Aufforderung erreicht ( $-3,2 \text{ m/s}^2$ ). Der Unterschied zum kom-

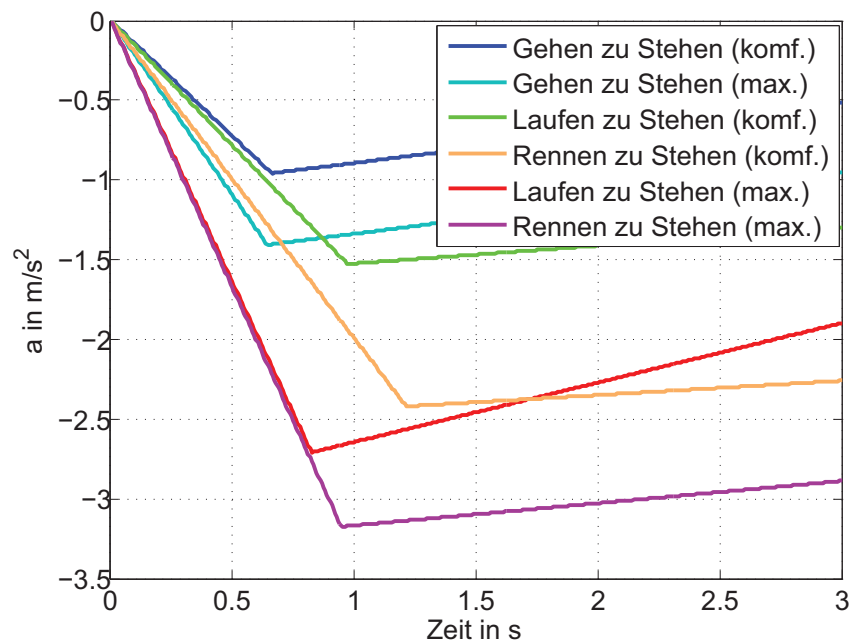


Abbildung 4.25:  $MUA^{av}$  für alle negativen Übergänge



Richtung	Übergang vom	Bereich max (Betrag)	Peaks	Peak $MUA^{av}$
+	Stehen zum Gehen	1,50	2,21	1,06
	Stehen zum Laufen	2,33	4,51	1,76
	Stehen zum Rennen	3,06	7,24	2,93
	Gehen zum Laufen	2,18	3,32	1,45
	Gehen zum Rennen	2,86	6,01	2,25
	Laufen zum Rennen	2,03	3,64	1,59
–	Gehen zum Stehen (komf)	-1,07	-2,38	-0,96
	Gehen zum Stehen (max)	-1,91	-2,89	-1,41
	Laufen zum Stehen (komf)	-1,85	-4,09	-1,53
	Laufen zum Stehen (max)	-3,93	-5,91	-2,71
	Rennen zum Stehen (komf)	-3,74	-5,94	-2,42
	Rennen zum Stehen (max)	-4,47	-6,93	-3,17

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Bereiche der maximalen (Betrag) Peaks und der Peaks der  $MUA^{av}$

fortablen Anhalten beträgt hier im Peak etwa  $0,8 \text{ m/s}^2$ . Des Weiteren wird der Peak beim komfortablen Anhalten erst ca. 250 ms später erreicht. Die zweithöchste Verzögerung wird aus dem Laufen erreicht, sie beträgt im mittleren Peak der  $MUA^{av}$  ca.  $-2,7 \text{ m/s}^2$  für die Aufforderung des schnellst möglichen Anhaltens. Hier ist der Unterschied zum komfortablen Übergang mit fast  $1,2 \text{ m/s}^2$  noch einmal deutlicher, wenn auch die zeitliche Differenz mit knapp 150 ms etwas geringer ausfällt. Aus dem Zustand Gehen werden im mittleren Peak noch  $-1,4 \text{ m/s}^2$  (maximales Anhalten) bzw.  $-0,95 \text{ m/s}^2$  (komfortables Anhalten) erreicht. Der zeitliche Unterschied im Peak ist hier zu vernachlässigen.

Auch bei den negativen Übergängen wird die Abhängigkeit der möglichen Beschleunigung vom aktuellen Bewegungszustand deutlich, muss an dieser Stelle aber anders interpretiert werden, da aus den verschiedenen Zuständen nur eine gewisse Geschwindigkeit abgebaut wird und dies nicht beliebig schnell passiert.

Die Bereiche der maximalen Peaks (im Betrag) und der Peaks der  $MUA^{av}$  sind zur Übersicht noch einmal in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Einflüsse der untersuchten Abhängigkeiten teilweise sehr groß sind und eine deutliche Abschwächung der Annahmen an die maximalen Beschleunigungsmöglichkeiten von Fußgängern erlauben. Die Untersuchung von komfortablen Bewegungsübergängen von Fußgängern hat einen teils sehr großen Unterschied im Vergleich zur maximal möglichen Bewegungsänderung ergeben. Dies kann in der Situationsanalyse genutzt werden, um die Durchführung einer Bewegungsänderung als möglich, aber weniger wahrscheinlich zu bewerten (siehe auch Abschnitt 4.6).



Name	Beschreibung
$F$ (feasible)	Die Trajektorie erfordert eine für den Fußgänger kaum merkliche Änderung seiner Bewegung.
$NF_{ped}^{min}$	Die Trajektorie ist für den Fußgänger komfortabel durchführbar, aber es ist eine merkliche Bewegungsänderung erforderlich.
$NF_{ped}^{comf}$	Die Trajektorie ist für den Fußgänger nicht mehr komfortabel durchführbar.
$NF_{ped}$	Die Trajektorie ist für den Fußgänger in der vorliegenden Situation nicht durchführbar.
$NF$ (not feasible)	Die Trajektorie ist selbst bei voll kooperativem Verhalten des Ego-Fahrzeugs nicht mehr durchführbar.

Tabelle 4.2: Ergebniskategorien für die Trajektorienbewertung eines Fußgängers

## 4.6 Das Modell in der Situationsanalyse

Die in Kapitel 3 bestimmten Trajektorien, mit denen der Fußgänger selbst eine drohende Kollision vermeiden kann, können nun mithilfe der  $MUA^{av}$  Kennlinien auf ihre Durchführbarkeit bewertet werden. Die Situationsanalyse bestimmt dazu zunächst, welche Zeit dem Fußgänger zur Bewegungsänderung bleibt und welche konstante Beschleunigung der Fußgänger in dieser Zeit aufbringen müsste. Zusammen mit der aktuellen Geschwindigkeit des Fußgängers werden diese Daten im Bewegungsmodell weiterverarbeitet.

Im ersten Schritt wird dabei der aktuelle Bewegungszustand des Fußgängers anhand seiner Geschwindigkeit bestimmt. Die Klassifikation des Zustands orientiert sich an den in Abschnitt 4.2 definierten Zuständen und Geschwindigkeiten. In den folgenden Unterabschnitten wird die Bewertung der einzelnen Trajektorien getrennt vorgestellt, da für jede Art der Trajektorie weitere unterschiedliche Faktoren berücksichtigt werden. Das Ergebnis der Bewertung wird hier in verschiedene Kategorien eingeteilt, welche in Tabelle 4.2 beschrieben werden. Die Bewertung reicht dabei von leicht durchführbar  $F$  (feasible) bis hin zu nicht durchführbar  $NF$  (not feasible) selbst bei kooperativem Verhalten des Ego-Fahrzeugs. Das bedeutet, selbst im Fall einer zusätzlichen Ausweichbewegung des Fahrzeugs in die entsprechende Richtung würde der Fußgänger den (nun aus seiner Sicht verschobenen) Fluchtpunkt nicht mehr erreichen können.

### Vorbemerkung

In der Folge bezeichnet  $MUA_{X,Y}^{av}$  die  $MUA^{av}$  Kennlinie für den Übergang zwischen Zustand  $X$  und Zustand  $Y$ . Die Zustände werden dabei jeweils durch den Anfangsbuchstaben ( $S, G, L, R$ ) abgekürzt, um die Formeln übersichtlich zu halten. Die Kennlinien der negativen Übergänge werden analog mit  $MUA_{X,comf}^{av}$  bzw.  $MUA_{X,max}^{av}$  bezeichnet.

Das Ergebnis der jeweiligen Bewertung einer Trajektorie  $T_i, i \in \{1, 2, 3\}$  sei mit  $R_{T_i}$  angegeben, die zusätzliche Ausweichbeschleunigung des Fahrzeugs bei kooperativem Verhalten wird mit  $a_{ego}^{lat} = 9,81 \text{ m/s}^2$  nach oben abgeschätzt.<sup>45</sup>

#### 4.6.1 Bewertung der positiven Trajektorie

Die *positive*<sup>46</sup> Trajektorie beschreibt die Möglichkeit des Fußgängers in seine bisherige Bewegungsrichtung zu beschleunigen, um noch rechtzeitig vor dem Fahrzeug den Fahrkorridor zu durchqueren. Dies schließt einen im Fahrkorridor stehenden Fußgänger mit ein, für ihn entfallen die beiden anderen Möglichkeiten, und stattdessen werden zwei positive Trajektorien (nach links bzw. rechts) bestimmt. Hier wird bei beiden Trajektorien angenommen, dass der Fußgänger bereits in die jeweilige Richtung blickt bzw. so steht, dass ein Umdrehen nicht nötig ist. Diese Annahme ist notwendig, da (bisher) noch keine Information über die Blickrichtung bzw. Ausrichtung des Fußgängers verfügbar ist (vergleiche auch Abschnitt 2.2.2).

Sei nun  $a_{ped,1}$  die benötigte Beschleunigung (siehe auch Abschnitt 3.3.2), welche der Fußgänger in der Zeit  $TTP$  einhalten muss. Die Bewertung der Bewegungsänderung geschieht nun abhängig von seinem bisherigen Bewegungszustand.

##### 1. Stehen:

Die Bewertung ergibt sich als  $R_{T_1}^S(a_{ped,1}, TTP)$ , mit der folgenden Definition:

$$R_{T_1}^S(a, t) = \begin{cases} F & \text{für } |a| \leq MUA_{S,G}^{av}(t), \\ NF_{ped}^{min} & \text{für } MUA_{S,G}^{av}(t) < |a| \leq MUA_{S,L}^{av}(t), \\ NF_{ped}^{comf} & \text{für } MUA_{S,L}^{av}(t) < |a| \leq MUA_{S,R}^{av}(t), \\ NF_{ped} & \text{für } MUA_{S,R}^{av}(t) < |a| \leq MUA_{S,R}^{av}(t) + a_{ego}^{lat}, \\ NF & \text{für } MUA_{S,R}^{av}(t) + a_{ego}^{lat} < |a|. \end{cases} \quad (4.18)$$

Ausgehend von der Annahme, dass der Fußgänger beim Übergang vom Stehen zum Rennen maximal beschleunigen kann, wird eine notwendige Beschleunigung, die darüber hinausgeht, als  $NF_{ped}$  bewertet, bzw. als  $NF$ , falls selbst bei einem zusätzlichen Ausweichmanöver des Fahrzeugs die entsprechende Beschleunigung überschritten wird. Die Bewertung  $NF_{ped}^{comf}$  erfolgt, falls der Fußgänger eine Beschleunigung größer als die im Übergang vom Stehen zum Laufen mögliche aufbringen muss. Hier ist davon auszugehen, dass dies nicht mehr als komfortabel bezeichnet werden kann. Falls die Beschleunigung unterhalb der im Übergang vom Stehen zum Laufen, aber

<sup>45</sup>Hier könnte eine weitere Verfeinerung der Annahme einen Nutzegewinn bringen, dies stand aber nicht im Fokus der Arbeit.

<sup>46</sup>Aus der Sicht des Fußgängers ist diese mit einer positiven Beschleunigung verbunden.

oberhalb der im Übergang vom Stehen zum Gehen erreichten liegt, wird die Bewertung  $NF_{ped}^{min}$  vergeben. Das bedeutet, die Bewegung ist komfortabel durchführbar, jedoch zumindest merklich für den Fußgänger. Eine benötigte Beschleunigung darunter wird entsprechend mit  $F$  bewertet.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass diese Bewertungsmethodik sowie die im Folgenden präsentierten nicht für alle Fußgänger gleichermaßen adäquat sein können. Dies trifft jedoch auf jede Bewertungsmethodik zu, da insbesondere der Begriff komfortabel subjektiv ist.

## 2. Gehen:

Die Bewertung im Fall eines gehenden Fußgängers erfolgt, mit Ausnahme der Bewertung  $F$ , analog zum stehenden Fußgänger (4.18). Es ergibt sich

$$R_{T_1}^G(a, t) = \begin{cases} NF_{ped}^{min} & \text{für } |a| \leq MUA_{G,L}^{av}(t), \\ NF_{ped}^{comf} & \text{für } MUA_{G,L}^{av}(t) < |a| \leq MUA_{G,R}^{av}(t), \\ NF_{ped} & \text{für } MUA_{G,R}^{av}(t) < |a| \leq MUA_{G,R}^{av}(t) + a_{ego}^{lat}, \\ NF & \text{für } MUA_{G,R}^{av}(t) + a_{ego}^{lat} < |a|. \end{cases} \quad (4.19)$$

Das bedeutet, es wird davon ausgegangen, dass jede weitere Beschleunigung in die bisherige Bewegungsrichtung zumindest merklich für den Fußgänger ist. Die Komfortgrenze wird, wie im Fall des stehenden Fußgängers, oberhalb des Übergangs zum Laufen erreicht.

## 3. Laufen:

Ein bereits laufender Fußgänger ist in seiner Beschleunigung in die bisherige Bewegungsrichtung bereits deutlich eingeschränkt, daher fällt in diesem Fall die Bewertung  $NF_{ped}^{min}$  weg und  $R_{T_1}^L$  wird wie folgt definiert:

$$R_{T_1}^L(a, t) = \begin{cases} NF_{ped}^{comf} & \text{für } |a| \leq MUA_{L,R}^{av}(t), \\ NF_{ped} & \text{für } MUA_{L,R}^{av}(t) < |a| \leq MUA_{L,R}^{av}(t) + a_{ego}^{lat}, \\ NF & \text{für } MUA_{L,R}^{av}(t) + a_{ego}^{lat} < |a|. \end{cases} \quad (4.20)$$

Es wird angenommen, dass ein laufender Fußgänger keine weitere positive Beschleunigung (aus seiner Sicht) aufbringen kann, ohne über seine Komfortgrenzen hinauszugehen.

## 4. Rennen:

Falls sich der Fußgänger bereits im Zustand des Rennens befindet, wird davon ausgegangen, dass er keinerlei weitere Beschleunigung in positiver Richtung aufbringen kann. Dies ist darin begründet, dass in der Studie der Zustand Rennen den maxi-

malen Bewegungszustand darstellt. Die Bewertung ergibt sich daher wie folgt:

$$R_{T_1}^R(a, t) = \begin{cases} NF_{ped} & \text{für } |a| \leq a_{ego}^{lat}, \\ NF & \text{für } a_{ego}^{lat} < |a|. \end{cases} \quad (4.21)$$

Diese Bewertung kann in Einzelfällen dazu führen, dass eine Trajektorie als nicht durchführbar bewertet wird, obwohl der Fußgänger noch weiter beschleunigen könnte. Der Zustand Rennen wird bereits ab einer Geschwindigkeit von 4 m/s angenommen, sportliche Fußgänger können jedoch bis zu 7 m/s erreichen. Das Modell ist (wie eingangs erwähnt) so ausgelegt, dass die Bewegungsmöglichkeiten eines Fußgängers eher überschätzt werden. Es kann aber immer Fälle geben, in denen die Bewegungsmöglichkeiten unterschätzt werden.<sup>47</sup>

#### 4.6.2 Bewertung der negativen Trajektorie

Die *negative*<sup>48</sup> Trajektorie des Fußgängers beschreibt die Möglichkeit, rechtzeitig vor Eintreten in den Fahrkorridor zum Stehen zu kommen (siehe Möglichkeit 3 in Kapitel 3). Für einen stehenden Fußgänger entfällt diese Möglichkeit, da sich dieser (um als gefährdet eingestuft zu werden) bereits im Fahrkorridor befindet.

Da es sich bei der Bewegungsänderung um ein Anhalten handelt und nicht um einen Übergang in einen anderen Zustand niedrigerer Geschwindigkeit, kann eine ähnliche Bewertung wie im Abschnitt 4.6.1 nicht durchgeführt werden. Daher wurden die Probanden gebeten, den Übergang zum Stehen sowohl komfortabel als auch schnellst möglich auf Zuruf durchzuführen. Um eine weitere Differenzierungsstufe unterhalb des komfortablen Anhaltens zu ermöglichen (welche für die Einstufung als  $NF_{ped}^{min}$  benutzt wird), wurde eine zusätzliche, künstliche Kennlinie für die jeweiligen Übergänge definiert. Es sei

$$MUA_{X,min}^{av} = 0,5 MUA_{X,comf}^{av}. \quad (4.22)$$

Diese Kennlinie entspricht also genau der Hälfte der noch komfortablen Verzögerung und wird als Grenze für die minimal merkliche Verzögerung benutzt.

Eine weitere Besonderheit liegt in einer zusätzlichen Bedingung für die maximale Zeit, die ein Übergang hier benötigen darf. Die in Kapitel 3 ermittelte Beschleunigung  $a_{ped,3}$  (siehe (3.29)) kann für größere  $TTP$  Werte zwar sehr klein, aber immer noch größer als beispielsweise  $MUA_{X,comf}^{av}(TTP)$  sein, da die Kennlinie nur bis zu der Zeit  $T^u$  (vergleiche Abschnitt 4.4.4) sinnvoll definiert ist. Dies führt bei den positiven Trajektorien zu einer

<sup>47</sup>Als Beispiel hierfür seien professionelle Sprinter genannt.

<sup>48</sup>Aus Sicht des Fußgängers tritt hier nur eine negative Beschleunigung auf.

Überschätzung der möglichen Bewegungsmöglichkeiten.<sup>49</sup> In diesem Fall würde es jedoch zu einer Unterschätzung führen.

Da die Bewertung für die verschiedenen Bewegungszustände ähnlich ist, wird sie an dieser Stelle allgemein beschrieben. Sei dazu erneut  $X$  ein Bewegungszustand (außer Stehen), d. h.  $X \in \{G, L, R\}$ . Für jeden Übergang sei die maximal gültige Zeit der Kennlinie  $MUA_{X,s}^{av}$ ,  $s \in \{min, comf, max\}$  als  $T_{X,s}^u$  definiert. Die Werte der  $T_{X,s}^u$  ergeben sich aus dem Maximum der für diesen Übergang benötigten Zeiten (siehe auch Abschnitt 4.4.3). Es gilt

$$T_{X,min}^u = T_{X,comf}^u \geq T_{X,max}^u. \quad (4.23)$$

Durch die unterschiedliche Bewertung in den verschiedenen Zeitabschnitten wird die Bewertungsfunktion  $R_{T_3}^X$  abschnittsweise definiert:

$$R_{T_3}^X(a, t) = \begin{cases} R_{T_3}^{X,max}(a, t) & \text{für } t \leq T_{X,max}^u, \\ R_{T_3}^{X,comf}(a, t) & \text{für } T_{X,max}^u < t \leq T_{X,comf}^u, \\ F & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.24)$$

Dabei sind  $R_{T_3}^{X,max}$  und  $R_{T_3}^{X,comf}$  wie folgt definiert:

$$R_{T_3}^{X,max}(a, t) = \begin{cases} NF & \text{für } |a| > |MUA_{X,max}^{av}(t)| + a_{ego}^{lat}, \\ NF_{ped} & \text{für } |MUA_{X,max}^{av}(t)| + a_{ego}^{lat} \geq |a| > |MUA_{X,max}^{av}(t)|, \\ NF_{ped}^{comf} & \text{für } |MUA_{X,max}^{av}(t)| \geq |a| > |MUA_{X,comf}^{av}(t)|, \\ NF_{ped}^{min} & \text{für } |MUA_{X,comf}^{av}(t)| \geq |a| > |MUA_{X,min}^{av}(t)|, \\ F & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.25)$$

$$R_{T_3}^{X,comf}(a, t) = \begin{cases} NF_{ped}^{comf} & \text{für } |a| > |MUA_{X,comf}^{av}(t)|, \\ NF_{ped}^{min} & \text{für } |MUA_{X,comf}^{av}(t)| \geq |a| > |MUA_{X,min}^{av}(t)|, \\ F & \text{sonst.} \end{cases} \quad (4.26)$$

Zur Veranschaulichung der Bewertungsfunktion sind die verschiedenen Bereiche (ohne  $NF$ ) in Abbildung 4.26 dargestellt. Für  $TTP \leq T_{X,max}^u$  geschieht die Bewertung nur anhand der verschiedenen Kennlinien. Zwischen  $T_{X,max}^u$  und  $T_{X,comf}^u$  reduziert sich nur die Anzahl der benutzten Kennlinien, die zur Bewertung genutzt werden. Jenseits von  $T_{X,comf}^u$  wird das Anhalten in jedem Fall mit  $F$  bewertet.

<sup>49</sup>Beispiel: Der Übergang vom Stehen zum Gehen wäre nur bis  $T^{max}$  definiert und der Wert  $MUA_{S,G}^{av}(TTP)$  für  $TTP > T^{max}$  ist unterschritten. Es wird dann angenommen, dass  $MUA_{S,G}^{av}(TTP)$  nicht überschritten ist, obwohl  $TTP > T^{max}$  gilt.

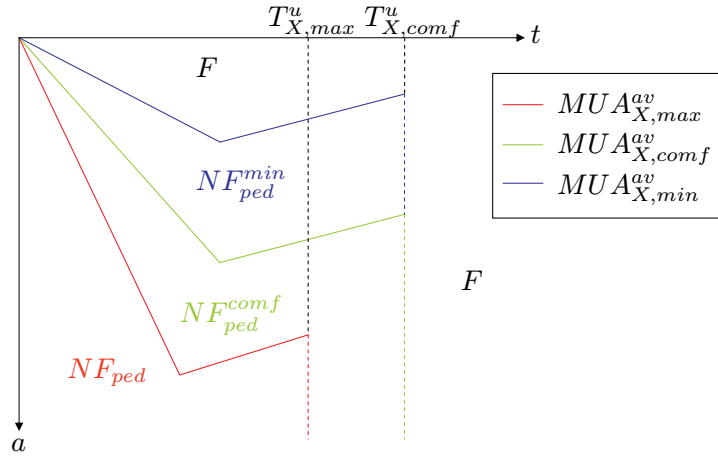


Abbildung 4.26: Veranschaulichung der Bewertungsfunktion für negative Trajektorien

### 4.6.3 Bewertung der gemischten Trajektorie

Das Besondere an der *gemischten Trajektorie* ist die Änderung der Bewegungsrichtung des Fußgängers während der Durchführung. Bei einer streng eindimensionalen Bewegung würde der Fußgänger anhalten und anschließend rückwärts aus dem Fahrkorridor wieder heraustreten. Eine andere Möglichkeit stellt das Umdrehen des Fußgängers und das anschließende Heraustreten dar. Auf die explizite Berücksichtigung des rückwärts Heraustretens wurde in dieser Arbeit verzichtet, da diese Bewegungsform implizit durch die folgende Bewertung mit abgeschätzt werden kann.

Die Bewegung wird in die Teilbewegungen Anhalten, Umdrehen und Beschleunigen unterteilt. Dies ist aufgrund des nötigen Umdrehens zwar keine eindimensionale Bewegung, kann aber im vereinfachten Modell so behandelt werden. Die Drehung wird durch eine zusätzliche Zeit ( $t_{turn} \geq 0$ ) berücksichtigt, welche von der zur Verfügung stehenden Zeit  $TTP$  abgezogen wird (bevor die Berechnung der Trajektorie aus Kapitel 3 durchgeführt wird).<sup>50</sup> Das bedeutet, für  $TTP > t_{turn}$  (für  $TTP \leq t_{turn}$  kann diese Möglichkeit für den Fußgänger von vornherein ausgeschlossen werden) geht (3.24) über in

$$\tilde{a}_{ped,2} = 2(TTP - t_{turn})^{-1} [(TTP - t_{turn})^{-1} (y^{right} - y_{ped}^0) - v_p^0]. \quad (4.27)$$

Die so berechnete benötigte Beschleunigung  $\tilde{a}_{ped,2}$ , die für  $t_{turn} > 0$  größer als die ursprünglich berechnete Beschleunigung  $a_{ped,2}$  ist, wird nun zweiteilig bewertet. Durch den Vorzeichenwechsel der Geschwindigkeit des Fußgängers müssen zunächst der Anhaltevorgang und anschließend das erneute Beschleunigen nach erfolgter Drehung bewertet werden. Wird dabei der Parameter  $t_{turn} = 0$  gewählt, so kann ebenfalls die Rückwärtsbewegung abgeschätzt werden. Für die Rückwärtsbeschleunigung werden dann die Kennlinien

<sup>50</sup>Geeignete Werte für  $t_{turn}$  werden in den Abschnitten 4.7 und 4.8 beschrieben.

der positiven Übergänge benutzt, was in diesem Fall zu einer deutlichen Überschätzung der Bewegungsmöglichkeiten führen kann.<sup>51</sup>

Für die Bewertung wird zunächst die Zeit  $t_{stop}$  berechnet, die der Fußgänger zum Anhalten mit der Verzögerung  $\tilde{a}_{ped,2}$  benötigt. Diese ergibt sich zu

$$t_{stop} = \frac{|v_p^0|}{|\tilde{a}_{ped,2}|}. \quad (4.28)$$

Falls zusätzlich (3.25)<sup>52</sup>, (3.26) erfüllt sind, d. h. der Fußgänger bei der gegebenen Beschleunigung  $\tilde{a}_{ped,2}$  den Fahrkorridor rechtzeitig verlassen hätte, gilt  $t_{stop} < TTP$ . Nun kann der erste Teil der Bewegung gemäß Abschnitt 4.6.2 mit der Verzögerung  $\tilde{a}_{ped,2}$  in der Zeit  $t_{stop}$  bewertet werden.

Der zweite Teil der Bewertung betrifft das erneute Beschleunigen. Hierfür steht noch die Zeit

$$t_{go} = TTP - t_{stop} - t_{turn} \quad (4.29)$$

zur Verfügung. Diese Bewertung geschieht entsprechend anhand der in Abschnitt 4.6.1 vorgestellten Methodik.

Die Gesamtbewertung der Trajektorie ergibt sich dann aus den beiden Teilbewertungen als eine Art Maximum. Damit ist gemeint, dass wenn ein Teil der Bewegung nicht mehr durchführbar ist, wird auch die gesamte Trajektorie als nicht durchführbar bewertet. Im Detail bedeutet dies, das Maximum wird bezüglich folgender Ordnung gebildet:

$$F \prec NF_{ped}^{min} \prec NF_{ped}^{comf} \prec NF_{ped} \prec NF. \quad (4.30)$$

Damit lässt sich die Gesamtbewertung der gemischten Trajektorie für einen Fußgänger im Bewegungszustand  $X$  (außer Stehen) wie folgt definieren:

$$R_{T_2}^X(\tilde{a}_{ped,2}, TTP) = \max(R_{T_3}^X(\tilde{a}_{ped,2}, t_{stop}), R_{T_1}^X(\tilde{a}_{ped,2}, t_{go})). \quad (4.31)$$

#### 4.6.4 Gesamtbewertung der Trajektorien

Die Bewertungsfunktionen für die verschiedenen Möglichkeiten des Fußgängers eine drohende Kollision noch selbst zu vermeiden, werden hier zu einer Gesamtbewertung zusammengefasst.

Je nach Fußgänger-Position und Geschwindigkeit werden in der Situationsanalyse die entsprechenden Trajektorien bestimmt. Bei einem im Fahrkorridor stehenden Fußgänger

<sup>51</sup>Es wird davon ausgegangen, dass Fußgänger aus dem Stand deutlich stärker vorwärts als rückwärts beschleunigen können.

<sup>52</sup>Ersetze in (3.25)  $a_{ped,2}$  durch  $\tilde{a}_{ped,2}$



kommen beispielsweise (wie oben erwähnt) nur zwei positive Trajektorien infrage (nach links und nach rechts). Ausgehend von einem sich lateral nähernden Fußgänger im Bewegungszustand  $X$  kann die Gesamtbewertung mit den Bezeichnungen aus den vorigen Abschnitten nun wie folgt beschrieben werden:

$$R^X = \min \left( R_{T_1}^X(a_{ped,1}, TTP), R_{T_2}^X(\tilde{a}_{ped,2}, TTP), R_{T_3}^X(a_{ped,3}, TTP) \right). \quad (4.32)$$

Das Minimum in (4.32) ist erneut in Bezug auf (4.30) zu verstehen. Das bedeutet, es wird die Bewertung der Möglichkeit übernommen, die für den Fußgänger am ehesten durchführbar erscheint. Dabei können nun die verschiedenen Bewertungsstufen in Kollisionswahrscheinlichkeitsstufen übersetzt werden:

- *CU (Collision Unavoidable)*:  
Die Kollision wird als unvermeidbar eingeschätzt, wenn  $R^X = NF$  gilt, da in diesem Fall jede Möglichkeit zur Kollisionsvermeidung durch das Bewegungsmodell als undurchführbar eingeschätzt wird.
- *CU<sub>ped</sub> (Collision Unavoidable by Pedestrian)*:  
Entsprechend wird bei  $R^X = NF_{ped}$  die Kollision als unvermeidbar für den Fußgänger eingeschätzt. Das bedeutet, dass die Kollision nur vermieden werden kann, wenn der Fahrer noch reagiert.
- *CU<sub>ped</sub><sup>comf</sup> (Collision Unavoidable by Pedestrian within comfortable Limits)*:  
Die Kollision kann durch den Fußgänger allein nur dann vermieden werden, wenn die entsprechenden Komfortgrenzen bei der Beschleunigung überschritten werden, d. h. falls gilt:  $R^X = NF_{ped}^{comf}$ .
- *PD (Potentially Dangerous)*:  
Falls das Ergebnis der Gesamtbewertung  $R^X = NF_{ped}^{min}$  beträgt, kann die Kollision durch den Fußgänger zwar noch komfortabel vermieden werden, jedoch besteht eine gewisse Gefahr, da er zumindest eine merkliche Beschleunigung aufbringen muss.
- *ND (No Danger)*:  
Falls dem Fußgänger zumindest eine mit  $F$  bewertete Möglichkeit bleibt und damit  $R^X = F$  gilt, wird die Situation als ungefährlich eingeschätzt.

Diese Gesamtbewertung kann nun in der Aktionsplanung genutzt werden, um die entsprechenden Maßnahmen anzusteuern. Zuvor sollen jedoch die Ergebnisse in verschiedenen Szenen präsentiert werden, insbesondere im Vergleich mit Standardannahmen für die Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern.



## 4.7 Ergebnisse in der Situationsanalyse

Die zuvor beschriebene Gesamtbewertung der möglichen Fußgängertrajektorien wird nun für verschiedene Szenen dargestellt. Zunächst sollen die Ergebnisse für  $CU$  und  $CU_{ped}$  näher betrachtet werden. Diese Bewertungen können in der Aktionsplanung genutzt werden, um beispielsweise eine automatische Notbremsung anzusteuern. Die Frage der Adäquatheit aus Abschnitt 2.4 kann im Fall  $CU$  leicht beantwortet werden, da in diesem Fall die Kollision bereits unvermeidbar ist, sodass allenfalls eine Kollisionsfolgenminderung möglich ist. Im Fall  $CU_{ped}$  kann die Kollision theoretisch durch kooperatives Verhalten des Fahrers und des Fußgängers noch vermieden werden. Um in diesem Fall weitere Sicherheit zu gewinnen, wäre bei zukünftiger Sensorik eine Freiflächen-Erkennung nützlich, um die Ausweichmöglichkeit des Fahrers eventuell ausschließen zu können. Auch eine Ausweichwunsch-Erkennung könnte einen solchen Eingriff rechtfertigen, beides war jedoch nicht Fokus dieser Arbeit.

Die Frage, ob überhaupt eine weitere Rechtfertigung nötig ist, stellt sich ebenfalls in Anbetracht der Tatsache, dass ein aufmerksamer Fahrer, der eine solche Notbremsung als ungerechtfertigt empfinden könnte, es sehr wahrscheinlich nicht bis zu dieser Eskalationsstufe kommen lassen würde.

In den folgenden Abbildungen 4.27 bis 4.30 sind jeweils die Ergebnisse  $CU$  und  $CU_{ped}$  der Situationsanalyse in verschiedenen Szenen dargestellt. Die Bereiche vor dem Fahrzeug illustrieren dabei das Ergebnis der Situationsanalyse, falls sich der Fußgänger in diesem Bereich befindet. Im Vergleich sind jeweils oben die Ergebnisse mit Bewegungsmodell und unten die Ergebnisse mit Standardannahmen ( $9,81 \text{ m/s}^2$  für Fahrzeug und Fußgänger) dargestellt. Die unterschiedlichen Szenen sind in Anhang C noch einmal zusammengefasst.

Abbildung 4.27 zeigt eine Szene mit einem im Fahrkorridor stehenden Fußgänger, die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt hier  $30 \text{ km/h}$  (entspricht Szenentyp  $p\_lon\_30\_0$ , siehe Anhang C). Es wird deutlich, dass durch die eingeschränkten Bewegungsmöglichkeiten des Fußgängers sowohl  $CU$  als auch  $CU_{ped}$  deutlich früher feststellbar sind als mit Standardannahmen. Eine ausgelöste Notbremsung<sup>53</sup> an der Spitze der jeweiligen Bereiche könnte hier zu den in Tabelle 4.3 aufgeführten Geschwindigkeitsreduktionen<sup>54</sup> führen. Eine Auslösung bei  $CU_{ped}$  könnte demnach mit Bewegungsmodell sogar zur vollständigen Kollisionsvermeidung ausreichen. Der Vorteil bei einer Auslösung bei  $CU$  beträgt immerhin noch  $4,4 \text{ km/h}$  was eine deutliche Verbesserung bei der Reduktion der Kollisionschwere bedeuten kann. Die gleiche Darstellung für einen stehenden Fußgänger und ein

---

<sup>53</sup>Es wurde hier die Annahme einer Totzeit von  $200 \text{ ms}$  und einer darauf folgenden Verzögerung von  $9 \text{ m/s}^2$  getroffen.

<sup>54</sup>Die aufgeführten Werte sind als die maximal möglichen zu verstehen. Automatische Bremseneingriffe mit Geschwindigkeitsreduktionen in diesen Bereichen erfordern einen teilweise sehr hohen Absicherungsaufwand, siehe erneut (Ebel et al. 2009).

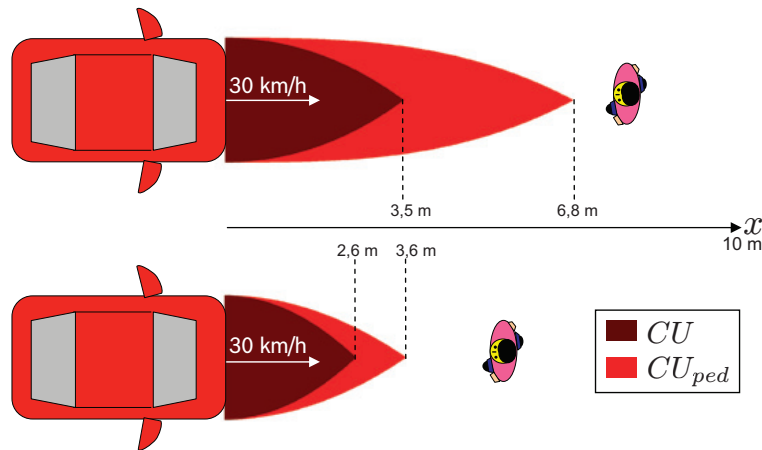


Abbildung 4.27: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h, Fußgänger steht

	$CU$	$CU_{ped}$
Bewegungsmodell	8,3	30
Standardannahmen	3,9	8,8
Differenz	4,4	21,2

Tabelle 4.3: Maximale Geschwindigkeitsreduktion mit und ohne Bewegungsmodell in km/h. Fußgänger steht, Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h

Fahrzeug, das sich nun mit 50 km/h dem Fußgänger nähert (Szenentyp p\_lon\_50\_0), ist in Abbildung 4.28 zu sehen. Die entsprechenden maximalen Geschwindigkeitsreduktionen finden sich in Tabelle 4.4. Es fällt auf, dass die möglichen Geschwindigkeitsreduktionen durch die höhere Geschwindigkeit insgesamt etwas niedriger sind, die Vorteile mit Bewegungsmodell sind daher ebenfalls etwas kleiner.<sup>55</sup>

Deutlichere Vorteile ergeben sich in Szenen, in denen der Fußgänger nicht im Fahrkorridor steht, sondern vor einem möglichen Unfall bewegt war. Abbildung 4.29 zeigt die Ergebnisse für einen gehenden Fußgänger mit Geschwindigkeit 5 km/h und ein Fahrzeug mit Geschwindigkeit 30 km/h (Szenentyp p\_lat\_30\_5). Die unterschiedliche Form der  $CU$ - und  $CU_{ped}$ -Bereiche im Vergleich mit und ohne Bewegungsmodell ergibt sich durch

	$CU$	$CU_{ped}$
Bewegungsmodell	7,9	27,9
Standardannahmen	3,7	8,2
Differenz	4,2	19,7

Tabelle 4.4: Maximale Geschwindigkeitsreduktion mit und ohne Bewegungsmodell in km/h. Fußgänger steht, Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h

<sup>55</sup>Auch wenn die  $TTC$  identisch ist, kann bei höherer Geschwindigkeit weniger Geschwindigkeit abgebaut werden, da die  $TTC$  nicht die Zeit ist, die für das eigentliche Bremsen zur Verfügung steht (vergleiche Abschnitt 2.4.1).

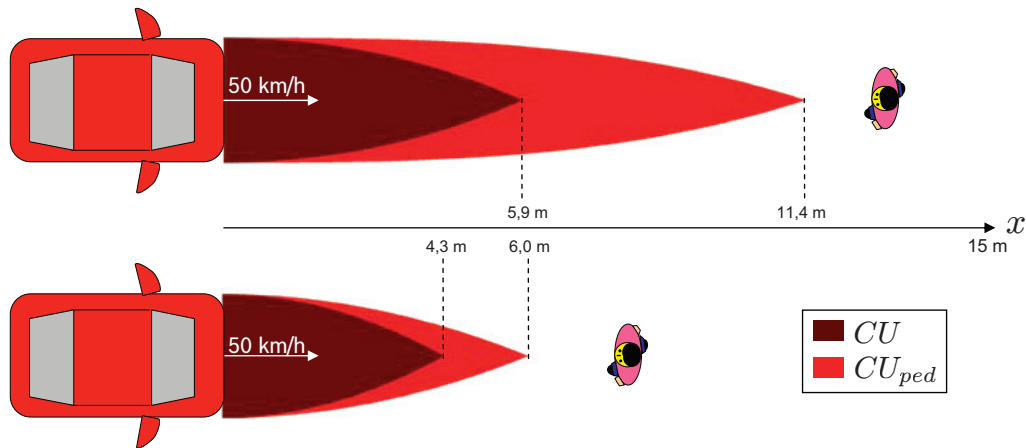


Abbildung 4.28: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h, Fußgänger steht

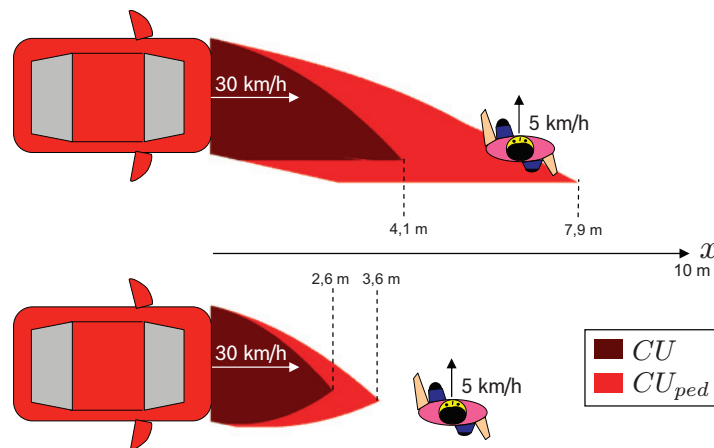


Abbildung 4.29: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h, Fußgänger geht mit 5 km/h

die im Bewegungsmodell explizit berücksichtigte Stopp-Trajektorie. Tabelle 4.5 fasst die maximal möglichen Geschwindigkeitsreduktionen zusammen.

Die mögliche Geschwindigkeitsreduktion ohne Bewegungsmodell ist identisch zur ersten Szene, in der der Fußgänger stand, da die Bewegung des Fußgängers keinen Einfluss auf die angenommenen Beschleunigungsmöglichkeiten hat. Bei Nutzung des Bewegungsmodells jedoch könnten in einer solchen Szene 3,5 km/h mehr abgebaut werden als bei einem stehenden Fußgänger (Auslösung bei  $CU$ ).

Die entsprechenden Ergebnisse bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h (Szenentyp p\_lat\_50\_5) finden sich in Abbildung 4.30 bzw. Tabelle 4.6. Die theoretisch mögliche Geschwindigkeitsreduktion könnte hier durch das Bewegungsmodell um bis zu 32,2 km/h gesteigert werden (Auslösung bei  $CU_{ped}$ ). Die Ergebnisse für die Zustände Laufen und Rennen des Fußgängers liefern sehr ähnliche Ergebnisse und finden sich in Anhang A. Obwohl die Bewegungsmöglichkeiten des Fußgängers in diesen Fällen teilweise noch deutlich

	$CU$	$CU_{ped}$
Bewegungsmodell	11,8	30
Standardannahmen	3,9	8,8
Differenz	7,7	21,2

Tabelle 4.5: Maximale Geschwindigkeitsreduktion mit und ohne Bewegungsmodell in km/h. Fußgänger geht mit 5 km/h, Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h

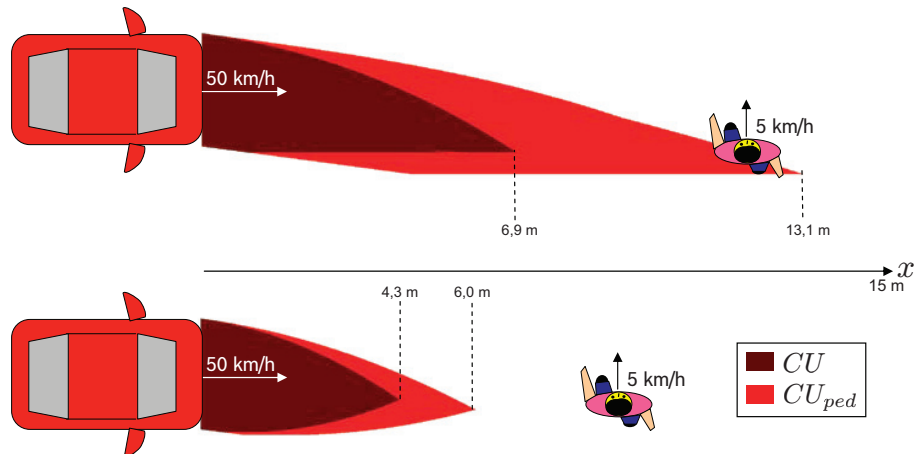


Abbildung 4.30: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h, Fußgänger geht mit 5 km/h

eingeschränkter sind, führt die hohe Geschwindigkeit des Fußgängers dazu, dass der Bereich innerhalb dessen sich Fußgänger und Fahrzeug auf Kollisionskurs befinden, deutlich schrumpft. Daher liegt die hier mögliche Geschwindigkeitsreduktion auf etwa dem gleichen Niveau.

## Warnfunktion

Für die Ausprägung der Fahrerwarnfunktion werden im Gesamtsystem die Bereiche  $CU_{ped}^{comf}$  und  $PD$  zusammen mit den in Kapitel 3 angesprochenen Sicherheitsbereichen genutzt. Abbildung 4.31 zeigt die Ergebnisse der Situationsanalyse inklusive der Bereiche  $CU_{ped}^{comf}$  und  $PD$  für einen stehenden Fußgänger und eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h (Szenentyp p\_lon\_30\_0). Die Bereiche  $CU$  und  $CU_{ped}$  sind dabei identisch zu denen in Abbildung 4.27. Die anderen Bereiche wurden mit den zusätzlichen Sicherheitsbereichen

	$CU$	$CU_{ped}$
Bewegungsmodell	10,8	40,4
Standardannahmen	3,7	8,2
Differenz	7,1	32,2

Tabelle 4.6: Maximale Geschwindigkeitsreduktion mit und ohne Bewegungsmodell in km/h. Fußgänger geht mit 5 km/h, Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h

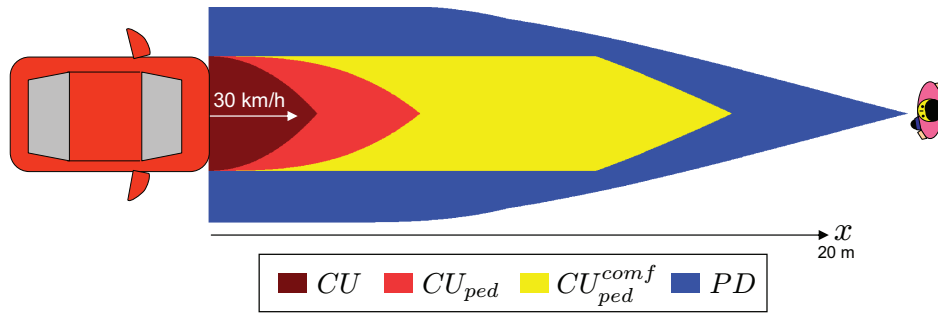


Abbildung 4.31: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell, inklusive Sicherheitszonen und Komfortbereiche, Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h, Fußgänger steht

um das Fahrzeug berechnet. Da für diese Sicherheitsbereiche keine direkte physikalische Begründung existiert, wurden diese anhand von Feldversuchen parametrisiert.

Die Fahrzeugfront wurde dabei virtuell um  $T_s \cdot v_{ego}$  nach vorne verschoben, wobei  $T_s = 0,5\text{ s}$  ein zeitlicher Sicherheitsfaktor zur Verlängerung der Warnzeit ist.<sup>56</sup> Die  $TTP$ , ab der sonst  $CU_{ped}^{comf}$  erreicht würde, liegt mit  $1,1\text{ s}$  etwa  $0,3\text{ s}$  unterhalb der geforderten Warnzeit  $t_w = 1,4\text{ s}$  in dieser Szene (vergleiche Kapitel 2). Für die Bewertung mit  $PD$  wurde die zusätzliche Überlegung berücksichtigt, dem Fahrer bei dieser Stufe eine Art Aufmerksamkeits-Warnung zu signalisieren. Diese „Vorwarnung“ soll auch dann ausgegeben werden, wenn der Fahrer sehr schnell an einem stehenden Fußgänger vorbeifährt und damit zu keiner Zeit ein tatsächlicher Kollisionskurs vorliegt. Daher wurde für die Stufe  $PD$  hier ein seitlicher Sicherheitsfaktor von  $f_{sd} = 0,1$  gewählt, was bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $30\text{ km/h} = 8,3\text{ m/s}$  zu einem Sicherheitsbereich von  $0,83\text{ m}$  auf jeder Seite führt (siehe auch Abschnitt 3.3.3).

In Abbildung 4.32 sind die gleichen Stufen noch einmal in einer Szene mit einem schnelleren Fahrzeug ( $v_{ego} = 50\text{ km/h}$ ) und einem laufenden Fußgänger ( $10\text{ km/h}$ ) (Szenentyp p\_lat\_50\_10) dargestellt.

## 4.8 Das erweiterte Modell

In Kapitel 3 wurde beschrieben, warum in der vorliegenden Arbeit der Spezialfall der eindimensionalen Fußgängerbewegung ohne Berücksichtigung beliebiger Drehungen behandelt wird. Aus Gründen der Vollständigkeit soll hier ein Modell zur zweidimensionalen Fußgängerbewegung beschrieben werden, welches das eindimensionale Modell als Spezialfall enthält. Dieses Modell wurde nicht in die Situationsanalyse integriert, ist jedoch so gestaltet, dass dies möglich wäre. Bei den Probandentests (Abschnitt 4.3) wurden ebenfalls einige Versuche zu diesem Modell durchgeführt.

<sup>56</sup>Dies ist motiviert durch die Überlegung, dass ein Fahrer innerhalb dieses Bereichs einen Fußgänger als sehr gefährdet einschätzen würde.

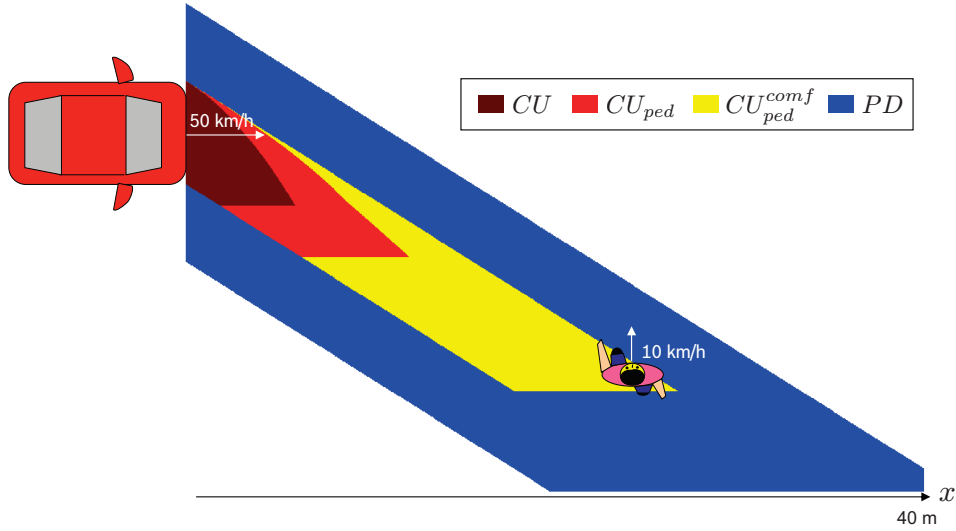


Abbildung 4.32: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell, inklusive Sicherheitszonen und Komfortbereiche, Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h, Fußgänger läuft mit 10 km/h

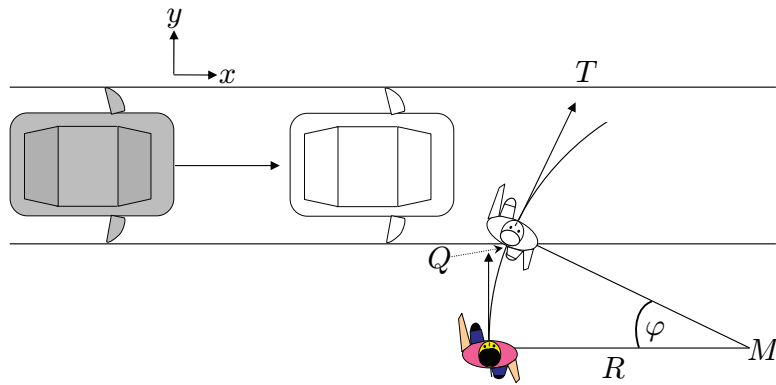


Abbildung 4.33: Veranschaulichung des 2D-Drehmodells

Die Bewegung des Fußgängers wird dabei (wie bereits in Kapitel 3 angedeutet) als eine kombinierte Drehung und Beschleunigung beschrieben. Die Trajektorie des Fußgängers, um einen beliebigen Punkt  $T$  aus seiner Ausgangsposition in gegebener Zeit  $t$  zu erreichen, besteht dabei aus einer Drehung mit Drehgeschwindigkeit  $\omega$  um Winkel  $\varphi$  und einer anschließenden Beschleunigung oder Verzögerung. Dies ist in Abbildung 4.33 verdeutlicht. Der Fußgänger kann den Punkt  $T$  erreichen, indem er zunächst eine Drehung entlang einer Kreisbahn vollzieht, bis er am Tangentialpunkt  $Q$  genau in Richtung  $T$  blickt. Die Kreisbahn wird dabei durch die angenommene Drehgeschwindigkeit  $\omega$  und die Fußgängergeschwindigkeit  $v_p$  definiert. Fasst man  $v_p$  als Tangentialgeschwindigkeit auf, ergibt sich der Radius  $R$  des Drehkreises aus

$$R\omega = v_p \quad (4.33)$$

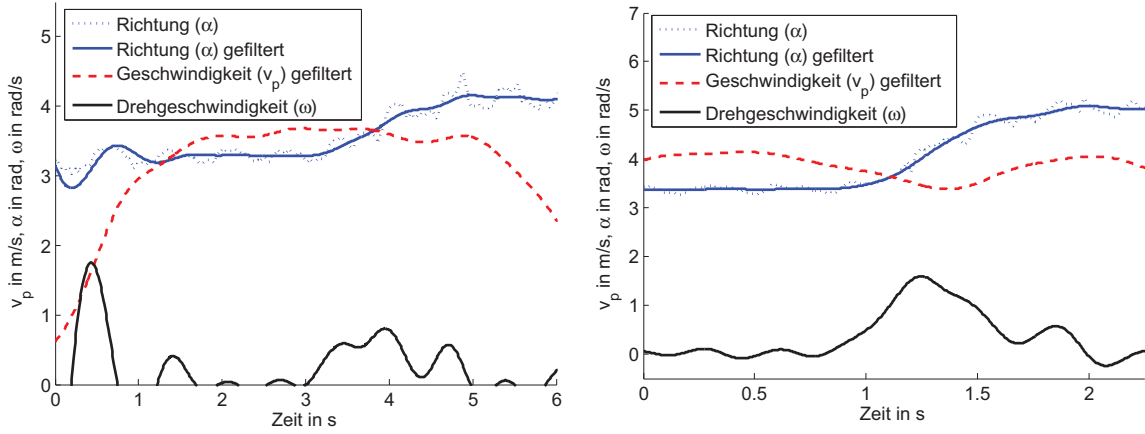


Abbildung 4.34: Geschwindigkeiten und Richtung eines Probanden während einer 45°-Drehung (links) und einer 90°-Drehung (rechts) aus dem Laufen heraus

zu

$$R = \frac{v_p}{\omega}. \quad (4.34)$$

Hier wird  $\omega$  als Funktion von  $v_p$  angenommen, da ein schnell bewegter Fußgänger beispielsweise nur langsamere Drehgeschwindigkeiten aufbringen kann als ein langsamerer Fußgänger. Die Geschwindigkeit  $v_p$  ändert sich in diesem Modell während der Drehung nicht, was für kleine  $\varphi$  oder kleine  $v_p$  gut mit den Testergebnissen der Probanden übereinstimmt.

Die Zeit, die der Fußgänger für die Drehung benötigt, ergibt sich aus dem Drehwinkel  $\varphi$  und der Drehgeschwindigkeit  $\omega$ . Somit kann die zweite Phase der Bewegung von  $Q$  nach  $T$  durch das eindimensionale Modell berechnet und bewertet werden.

Für höhere Geschwindigkeiten  $v_p$  in Kombination mit größeren Richtungsänderungen  $\varphi$  könnte theoretisch eine andere Bahnkurve als die Kreisbahn gewählt werden. Für den Einsatz im Kontext der Situationsanalyse relevant wäre hier eine etwaige Geschwindigkeitsänderung des Fußgängers in Abhängigkeit der Drehung, da sich dadurch die Bewertung im eindimensionalen Modell ändern könnte.

Die Probandentests haben jedoch gezeigt, dass solche Geschwindigkeitsänderungen in relevanter Höhe erst bei Richtungsänderungen auftreten, für die eine anschließende eindimensionale Bewertung nicht mehr sinnvoll ist. Ein lateral querender Fußgänger beispielsweise, welcher eine Bewegungsänderung um 90° vollzieht, bewegt sich anschließend in die gleiche oder entgegengesetzte Fahrtrichtung des Fahrzeugs und ist damit keiner Kollisionsgefahr mehr ausgesetzt.<sup>57</sup> Als Beispiel zeigt die Abbildung 4.34 den Verlauf der Geschwindigkeit eines Probanden bei einer Drehung um 45° (links) bzw. 90° (rechts) aus dem Laufen heraus. Es ist deutlich zu sehen, dass die Fußgängergeschwindigkeit bei der

<sup>57</sup>Es würden nur Punkte  $T$  zur Berechnung verwendet, die nicht im Fahrkorridor liegen.

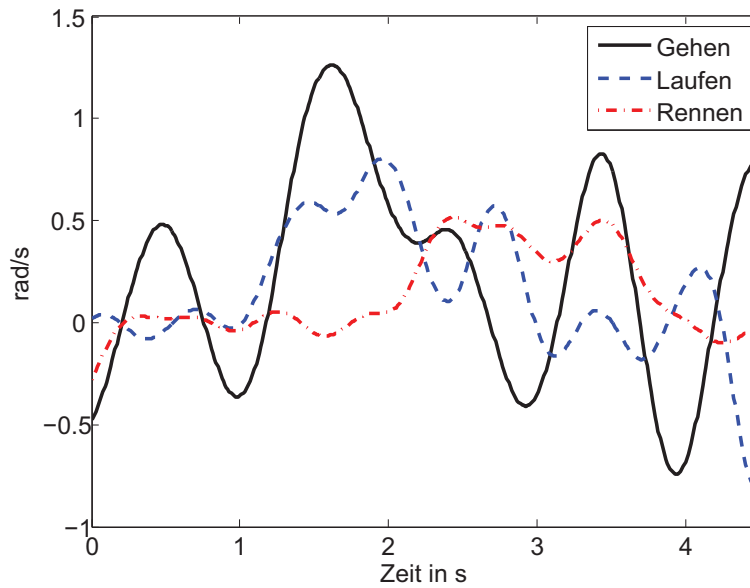


Abbildung 4.35: Drehgeschwindigkeiten bei einer  $45^\circ$ -Drehung aus verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten

$45^\circ$ -Drehung annähernd konstant verläuft (während der Drehung), während sie bei der  $90^\circ$ -Drehung leicht abfällt.

Den größten Einfluss im Modell hat die mögliche Drehgeschwindigkeit  $\omega$  des Fußgängers. Diese kann wie bereits erwähnt von der Geschwindigkeit  $v_p$  des Fußgängers abhängen. Abbildung 4.35 zeigt die Drehgeschwindigkeiten eines Probanden bei einer  $45^\circ$ -Drehung aus verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten. Die teilweise hohen Schwankungen in den Werten sind durch die jeweilige Geschwindigkeit zu erklären. Die mit der VBox gemessene Richtung des Fußgängers wird präziser gemessen, wenn sich der Fußgänger schneller bewegt. Daher schwankt insbesondere die aus dem Gehen abgeleitete Drehgeschwindigkeit deutlich. Es ist allerdings gut zu erkennen, dass die jeweils maximal erreichte Drehgeschwindigkeit mit zunehmender Fußgängergeschwindigkeit abnimmt. Aus dem Gehen heraus liegt der Peak bei etwa  $1,25 \text{ rad/s}$  (ca.  $70^\circ/\text{s}$ ), beim Laufen sinkt dieser bereits auf  $0,8 \text{ rad/s}$  (ca.  $45^\circ/\text{s}$ ) ab. Die Drehgeschwindigkeit aus dem Rennen heraus erreicht nur noch einen Peak von knapp über  $0,5 \text{ rad/s}$  (ca.  $30^\circ/\text{s}$ ).

Für eine genauere Untersuchung insbesondere auch bei Drehungen um kleinere Winkel schwanken die gemessenen Werte mit der VBox jedoch zu stark, sodass hier eine alternative Messmethode benötigt würde.



# 5 Situationsanalyse im Vergleich

Der in den vorigen Kapiteln 3 und 4 entwickelte Situationsanalyse-Ansatz *PMM* wird in diesem Kapitel auf die Leistungsfähigkeit in verschiedenen Szenen (für eine Übersicht der Szenentypen siehe Anhang C) geprüft und mit anderen aus der Literatur bekannten Ansätzen verglichen. Dazu werden zunächst die berücksichtigten Ansätze vorgestellt, anschließend die benutzte Bewertungsmethodik sowie die Ergebnisse.

## 5.1 Berücksichtigte Ansätze

Im Zuge dieser Arbeit wurden mehrere bekannte Ansätze zur Situationsanalyse umgesetzt, um den neu entwickelten *PMM*-Ansatz mit diesen nicht nur theoretisch (siehe Kapitel 3) vergleichen zu können. Für den praktischen Vergleich wurden analog zu den Kollisionswahrscheinlichkeitsstufen aus Abschnitt 4.6.4 vier Eskalationsstufen definiert, welche für eine Systemreaktion genutzt werden können. Diese sind im Einzelnen:

- *PW* (*Pre-Warn*): die niedrigste Eskalationsstufe, welche sich für die Vorwarnung bzw. Aufmerksamkeitssteuerung des Fahrers eignet. Sie ist vergleichbar mit der Stufe *PD* (siehe Kapitel 4).
- *W* (*Warn*): die zweite Eskalationsstufe, bei der die Fahrerwarnung initialisiert werden soll (vergleichbar mit  $CU_{com,f}^{ped}$ ).
- *EB<sub>1</sub>* (*Emergency-Brake 1*): entspricht beim *PMM*-Ansatz der Stufe  $CU^{ped}$  und soll eine erste mögliche Stufe für eine automatische Notbremsung darstellen.
- *EB<sub>2</sub>* (*Emergency-Brake 2*): die höchste betrachtete Eskalationsstufe (vergleichbar mit *CU*).

Diese Stufen können im Gegensatz zu denen aus Abschnitt 4.6.4 (noch) nicht direkt als Kollisionswahrscheinlichkeitsstufen bezeichnet werden, sie stellen vielmehr eine mögliche Abstufung einer Eingriffsstrategie dar. Die verschiedenen Ansätze wurden so parametrisiert, dass ihre Ausgaben jeweils mit den entsprechenden Stufen des *PMM*-Ansatzes vergleichbar sind. Für den Vergleich wurden die folgende Ansätze praktisch umgesetzt:

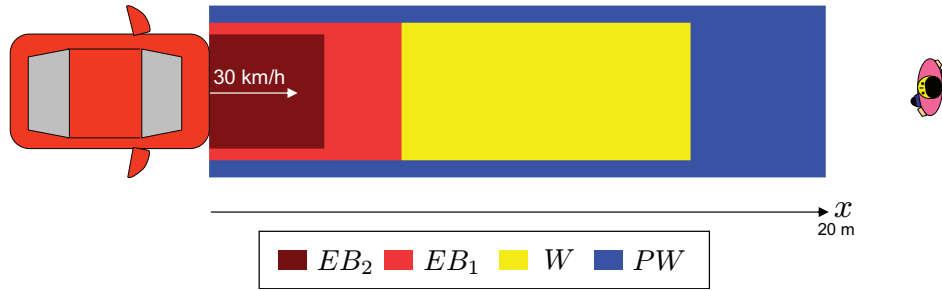


Abbildung 5.1: Eskalationsstufen im *TTC*-Ansatz, Fußgänger steht, Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h

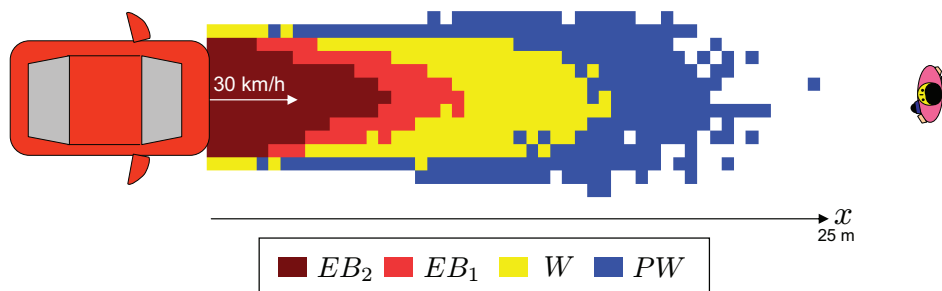


Abbildung 5.2: Eskalationsstufen im *RND*-Ansatz, Fußgänger steht, Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h

1. *GEO*: ein geometrischer Ansatz (siehe Abschnitt 3.2.4) mit festen Warnbereichen vor dem Fahrzeug unabhängig von der Bewegung des Fußgängers.
2. *TTC*: ein klassischer *TTC*-Ansatz, welcher über die Bestimmung der Zeit bis zur möglichen Kollision ein Maß für die Kollisionswahrscheinlichkeit definiert. Unterschreitet die *TTC* einen definierten Schwellwert, wird die Eskalationsstufe entsprechend erhöht. Eine Veranschaulichung der Eskalationsstufen in diesem Ansatz findet sich in Abbildung 5.1 für einen stehenden Fußgänger und eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h (Szenentyp p\_lon\_30\_0).
3. *RND*: ein stochastischer Ansatz, angelehnt an den *Random Walk Ansatz* (siehe Kapitel 3). Die Bewegung des Fußgängers wird in lateraler Richtung durch eine zufällige Beschleunigung überlagert. Die Kollisionswahrscheinlichkeiten ergeben sich aus einer Monte-Carlo-Simulation. Die Eskalationsstufen in einer Beispielsituation (Szenentyp p\_lon\_30\_0) sind in Abbildung 5.2 dargestellt.
4. *DC*: ebenfalls ein stochastischer Ansatz, angelehnt an die Modellierung der Fußgänger-Bewegung über ein *Discrete Choice Framework* (Antonini und Bierlaire 2006). Hier hat der Fußgänger zu jedem Zeitschritt die Wahl, in mehreren festen Stufen zu beschleunigen oder zu verzögern.

Da die verschiedenen Ansätze unterschiedliche Parameter aufweisen, mussten sie für einen sinnvollen Vergleich entsprechend ähnlich parametrisiert werden. Dies geschah anhand von simulierten Szenen (s. Abschnitt 5.3) mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 50 km/h und einem stehenden Fußgänger (Szenentyp `p_lon_50_0`).

## 5.2 Entwicklungsumgebung

Die genutzte Entwicklungsumgebung zur Simulation und „Nachsimulation“ wird im Anhang B im Detail erläutert. An dieser Stelle ist jedoch die Unterscheidung zwischen den beiden Begriffen Simulation und Nachsimulation wichtig. Der Begriff Nachsimulation beschreibt dabei den nachträglichen Test der Algorithmen mit realen Daten, welche vorher im Versuchsfahrzeug aufgezeichnet wurden. Dies bietet den Vorteil, eine Szene mit verschiedenen Algorithmen reproduzierbar testen zu können. Im Fall einer singulär eingreifenden Funktion ist die Nachsimulation möglich, da die Funktion nicht Bestandteil des permanenten Regelkreises ist.<sup>58</sup>

In der Simulation werden die verschiedenen Ansätze entsprechend mit künstlichen Sensordaten getestet. Dabei können im eingesetzten Framework verschiedene Sensormodelle verwendet werden.

## 5.3 Simulation

Ein erster Test der verschiedenen Ansätze wurde in simulierten Szenen mit idealen Sensordaten durchgeführt, um die generelle Eignung der Ansätze zu überprüfen. Die Simulationen teilen sich dabei in zwei Kategorien, die *positiven* (Szenentyp beginnend mit p) und *negativen* (Szenentyp beginnend mit n) Szenen. Eine Szene wird dabei als *positiv* beschrieben, wenn eine Systemreaktion erwünscht ist und entsprechend als *negativ*, wenn keine Systemreaktion erwünscht ist.

### 5.3.1 Positive Szenen

Die positiven Szenen beinhalten einen vor dem Fahrzeug unbewegt stehenden Fußgänger (`p_lon_ego_0`) sowie einen von rechts<sup>59</sup> querenden Fußgänger mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (`p_lat_ego_v_ped`). Des Weiteren wurden für jede Szene Variationen des Anprallpunkts des Fußgängers an das Fahrzeug berücksichtigt. Es wurde hier un-

---

<sup>58</sup>In einem kontinuierlich aktiven System wie zum Beispiel einem Abstandsregelautomat ist diese Vorgehensweise nicht möglich.

<sup>59</sup>Aufgrund der Symmetrie der Ansätze wurde ein von links querender Fußgänger nicht betrachtet.

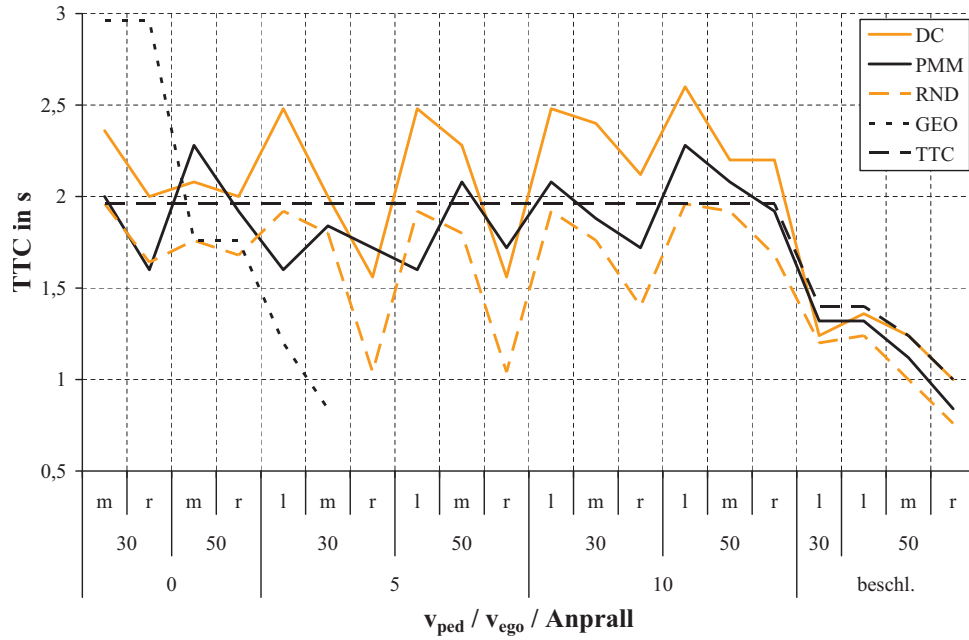


Abbildung 5.3: Ergebnisse der SIT-Ansätze für Eskalationsstufe  $W$  in simulierten, positiven Szenen

terschieden zwischen einem Anprall links, mittig oder rechts an die Fahrzeugfront. Die berücksichtigten Fahrzeuggeschwindigkeiten ( $v_{ego}$ ) sind 30 km/h und 50 km/h. Die Fußgängergeschwindigkeit ( $v_{ped}$ ) wurde zwischen 0 km/h (Fußgänger steht), 5 km/h (Fußgänger geht), 10 km/h (Fußgänger läuft) und einer zunehmenden Geschwindigkeit, bei der der Fußgänger konstant beschleunigt ( $p\_lat\_v_{ego\_0\_a_{ped}}$  mit  $a_{ped} = 2 \text{ m/s}^2$ ), variiert. In Abbildung 5.3 sind die Zeiten vor der Kollision dargestellt, bei denen der jeweilige Ansatz die Eskalationsstufe  $W$  erreicht hat, d.h. die Stufe, welche für eine Fahrerwarnung benutzt werden soll. Zunächst muss erklärt werden, warum für die Konfiguration  $v_{ego} = 30 \text{ km/h}$  mit beschleunigendem Fußgänger nur der Anprallpunkt links dargestellt ist. In der Simulation wurde ein einfaches Sensormodell benutzt, welches zwar ideale Daten liefert, jedoch einen künstlich eingeschränkten Öffnungswinkel aufweist (orientiert an realer Sensorik). In den Szenen mit Anprallpunkt rechts bzw. mittig bewegt sich der Fußgänger sehr knapp am Rand des künstlichen Erfassungsbereichs entlang und wird erst wenige Millisekunden vor der Kollision vom künstlichen Sensor erfasst. Daher wurde hier nur der Anprallpunkt links berücksichtigt.

Es ist zunächst auffällig, dass der *GEO*-Ansatz in sehr vielen Szenen überhaupt keine Eskalationsstufe liefert, was an der mangelnden Berücksichtigung der Fußgängerdynamik liegt. Da sich die Warnzonen vor dem Fahrzeug nicht in Abhängigkeit der Fußgängergeschwindigkeit anpassen, werden in diesen Szenen entsprechend keine Ergebnisse erzielt.

Alle Ansätze haben erwartungsgemäß Probleme bei dem beschleunigten Fußgänger, da dieser erst vergleichsweise spät überhaupt gefährdet ist.<sup>60</sup>

Der *TTC*-Ansatz liefert naturgemäß konstante Warnzeiten, wenn der Fußgänger nicht beschleunigt, da in diesem Ansatz die Eskalationsstufen nur von der *TTC* abhängen. Die beiden stochastischen Ansätze verhalten sich im Prinzip sehr ähnlich und unterscheiden sich hauptsächlich durch das Niveau der Warnzeiten, welches durch eine andere Parametrierung korrigiert werden könnte. Allerdings sinkt hier die Warnzeit sehr stark beim Auftreffen des Fußgängers an der rechten Seite der Fahrzeugfront. Der *PMM*-Ansatz liefert insgesamt sehr plausible Ergebnisse, die Warnzeiten sind aber erwartungsgemäß beim nicht mittigen Auftreffen des Fußgängers ein wenig geringer, da der Fußgänger in diesen Fällen noch länger komfortable Möglichkeiten hat die Kollision zu vermeiden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass bis auf den geometrischen Ansatz alle Ansätze in dieser Form geeignet sind, unter idealen Bedingungen gute Ergebnisse zu liefern.

### 5.3.2 Negative Szenen

Wie bereits in der Einführung der verschiedenen Ansätze in Kapitel 3 erwähnt, können viele Ansätze in Szenen, die tatsächlich zu einer Kollision führen, gute Ergebnisse liefern. Dies sagt jedoch noch nichts über das Verhalten in den Szenen aus, in denen keine Systemreaktion erwünscht ist. Um dies zu überprüfen, wurde eine Reihe von Szenen definiert, die nicht zur Kollision zwischen Fahrzeug und Fußgänger führen. Bei diesen Szenen kann eine Warnung für manche Fahrer im subjektiven Empfinden gerechtfertigt erscheinen, insbesondere bei zwei der zehn Szenen, welche relativ knapp erscheinen. Die definierten Szenen werden hier zunächst vorgestellt, anschließend werden dann die Ergebnisse der Ansätze präsentiert. Eine Übersicht der Szenen findet sich auch in Anhang C.

- Szene 1 (*n\_lon\_pass\_v\_ego\_d*): der Fußgänger steht unbewegt am Rand der Fahrbahn. Der laterale Abstand zum Fahrkorridor beträgt  $d = 1,2$  m für  $v_{ego} = 30$  km/h bzw.  $d = 2$  m für  $v_{ego} = 50$  km/h.
- Szene 2 (*n\_lat\_pass\_v\_ego\_5\_0\_dx*): der Fußgänger geht in ausreichendem Abstand mit  $v_{ped} = 5$  km/h über die Straße. Beim Verlassen des Fahrkorridors beträgt der Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger  $dx = 16$  m für  $v_{ego} = 30$  km/h bzw.  $dx = 26$  m für  $v_{ego} = 50$  km/h.
- Szene 3 (*n\_lat\_pass\_v\_ego\_10\_0\_dx*): der Fußgänger läuft in ausreichendem Abstand mit  $v_{ped} = 10$  km/h über die Straße. Beim Verlassen des Fahrkorridors beträgt

---

<sup>60</sup>In einer Szene, in der ein Fußgänger kurz vor einem vorbeifahrenden Fahrzeug auf die Straße tritt und vorher unbewegt war, kann vorher keine höhere Risikoeinschätzung getroffen werden.

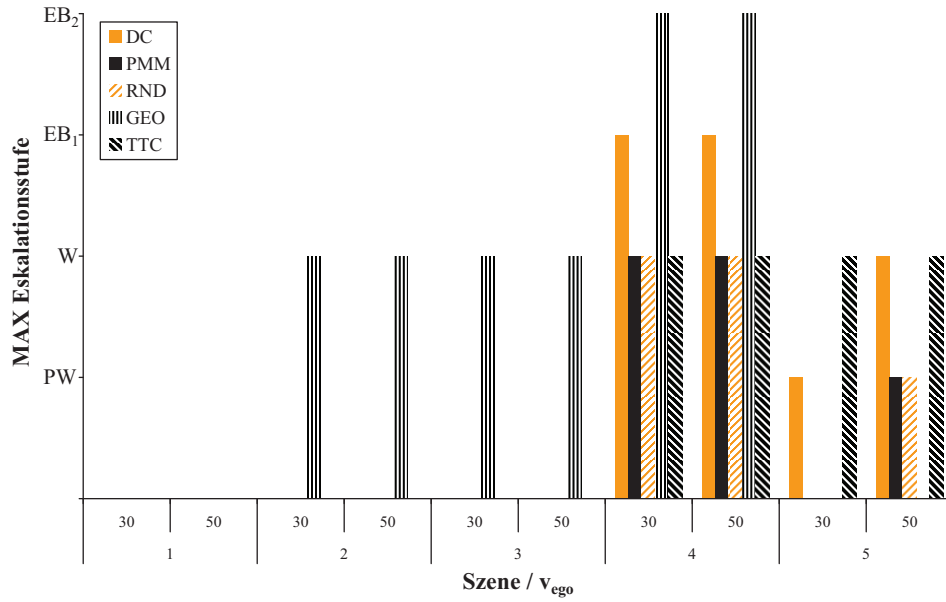


Abbildung 5.4: Maximale Eskalationsstufe der SIT-Ansätze in simulierten, negativen Szenen

der Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger  $dx = 12$  m für  $v_{ego} = 30$  km/h bzw.  $dx = 23$  m für  $v_{ego} = 50$  km/h.

- Szene 4 (n\_lat\_pass\_v\_ego\_0\_2\_dx): der Fußgänger beschleunigt (mit  $2 \text{ m/s}^2$ ) aus dem Stand, um die Fahrbahn noch rechtzeitig zu überqueren. Beim Verlassen des Fahrkorridors beträgt der Abstand zwischen Fahrzeug und Fußgänger  $dx = 2,5$  m für  $v_{ego} = 30$  km/h bzw.  $dx = 4,2$  m für  $v_{ego} = 50$  km/h. Diese Szene führt zwar nicht zu einer Kollision, ist aber sehr knapp, sodass hier eine Warnung durchaus als gerechtfertigt angesehen werden kann. Die Auslösung einer Notbremsung ist hier jedoch fraglich.
- Szene 5 (n\_lat\_stop\_v\_ego\_5\_-1\_d): der Fußgänger bewegt sich mit  $v_{ped} = 5$  km/h auf den Fahrkorridor und hält dann rechtzeitig (mit einer Verzögerung von  $-1 \text{ m/s}^2$ ) an. Der laterale Abstand zum Fahrkorridor, bei dem der Fußgänger stehen bleibt, beträgt  $d = 1,5$  m für  $v_{ego} = 30$  km/h sowie  $d = 1,4$  m für  $v_{ego} = 50$  km/h.

In Abbildung 5.4 sind die jeweils maximal erreichten Eskalationsstufen (von  $PW$  bis  $EB_2$ ) der Ansätze in den verschiedenen Szenen dargestellt. In Szene 1 hat dabei keiner der Ansätze reagiert, was unter idealen Sensordaten zu erwarten war. In Szene 2 und 3 kommt es beim *GEO*-Ansatz zu Warnreaktionen, da hier, wie bereits erwähnt, die Dynamik des Fußgängers nicht betrachtet wird. Die Reaktion in Szene 4 ist für alle Ansätze mindestens  $W$ , was aufgrund der sehr knappen Szene auch durchaus gerechtfertigt ist. Hier kommt es allerdings beim *DC*-Ansatz zur Eskalationsstufe  $EB_1$ , beim *GEO*-Ansatz sogar zur Eskalationsstufe  $EB_2$ . Diese Ausprägung ist in dieser Szene zumindest fraglich, da es nicht zur Kollision kommt und der Fußgänger rechtzeitig den Fahrkorridor wieder verlassen hat. In Szene 5 kommt es bei  $v_{ego} = 30$  km/h zur Vorwarnung ( $PW$ ) beim *DC*-

Ansatz, beim *TTC*-Ansatz sogar zur Warnung (*W*). Eine Vorwarnung ist in dieser Szene vielleicht noch akzeptabel, eine Warnung sollte jedoch nicht ausgegeben werden. Selbiges gilt für Szene 5 bei  $v_{ego} = 50$  km/h, bei der sowohl der *TTC*- als auch der *DC*-Ansatz die Eskalationsstufe *W* erreichen. Hier erreichen auch der *PMM*- und der *RND*-Ansatz jeweils die Eskalationsstufe *PW*.

Der *GEO*-Ansatz zeigt demnach auch für die negativen Szenen deutliche Schwächen und wird in der Form nicht für eine Warn- oder Notbremsfunktion geeignet sein. Der *DC*-Ansatz scheint ebenfalls nur bedingt geeignet, während der *RND*-Ansatz hier besser abschneidet. Dies liegt auch in der Parametrierung begründet, die, wie im vorigen Abschnitt gesehen, deutlich spätere Warnzeiten ergibt als bei den anderen Ansätzen. Der *TTC*-Ansatz hat naturgemäß Schwierigkeiten bei anhaltenden Fußgängern, was im Innenstadtverkehr entsprechend zu Fehlwarnungen führen könnte. Der *PMM*-Ansatz liegt bei den negativen Szenen mit nur einer diskutablen Vorwarnung (*PW*) auf dem Niveau des *RND*-Ansatzes, bietet aber in den positiven Szenen die höheren Warnzeiten.

### 5.3.3 Fazit

Insgesamt lässt sich aus dem Verhalten in den simulierten Szenen festhalten, dass mit Ausnahme des geometrischen Ansatzes alle Ansätze bei positiven Szenen so parametrierbar sind, dass eine akzeptable Warnzeit erreichbar ist. Allerdings schwankt die Warnzeit beim *RND*-Ansatz teilweise deutlich und erreicht beim Aufprall des Fußgängers an die rechte Fahrzeugfront nicht mehr die geforderte Größe.

Bei den negativen Szenen ist der geometrische Ansatz ebenfalls unbrauchbar, hier zeigen sich aber auch beim *TTC*- und beim *DC*-Ansatz deutliche Schwächen. Hierzu muss erneut erwähnt werden, dass das Verhalten der Ansätze in negativen Szenen teilweise einer subjektiven Bewertung unterliegt.

Deutlich relevanter ist das Verhalten der Ansätze unter realen Bedingungen, d. h. mit nicht idealen Sensordaten und eventuell fälschlicherweise als Fußgänger klassifizierten Objekten.

## 5.4 Test mit realen Daten

In diesem Abschnitt werden die Ansätze (bis auf den *GEO*-Ansatz<sup>61</sup>) mit realen Sensordaten getestet. Die eingesetzte Sensorik bestand dabei aus einem Stereo-Videosystem (Näheres dazu in Kapitel 6).

---

<sup>61</sup>Die Leistung des Ansatzes in der Simulation hat bereits gezeigt, dass keine adäquaten Ergebnisse mit Realdaten zu erwarten sind.





Abbildung 5.5: Testanlage der Audi AG in Neustadt, Brücke (links) und Fußgängerdummy (rechts), Quelle: Audi AG

Es muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass eine rein objektive Bewertung der Leistung der verschiedenen Ansätze mit realen Daten nicht möglich ist, da es zu Sensor-Effekten kommen kann, welche in verschiedenen Ansätzen unterschiedlich stark durchschlagen. Daher ist die folgende Bewertung immer im Zusammenhang mit der eingesetzten Sensorik zu betrachten.<sup>62</sup>

#### 5.4.1 Positive Szenen

Die positiven Szenen, in denen eine Systemreaktion erwünscht ist, wurden mithilfe eines Fußgängerdummys durchgeführt, um keine Personen zu gefährden. Dazu konnte eine Testanlage<sup>63</sup> genutzt werden (siehe Abbildung 5.5), die es ermöglicht, einen Dummy kontrolliert in verschiedenen Geschwindigkeiten vor das Fahrzeug zu bewegen und diesen sehr kurz vor der Kollision sicher nach oben wegzuziehen. Auf diese Weise konnten verschiedene Szenen reproduzierbar gestellt werden, ohne dabei den Dummy oder das Fahrzeug zu gefährden.

Die in Abbildung 5.6 dargestellten Ergebnisse sind in insgesamt 19 Testszenen mit verschiedenen Fahrzeug- und Dummy-Geschwindigkeiten entstanden und zeigen die  $TTC$  zum Zeitpunkt der Ausgabe der Eskalationsstufe  $W$ . Die gefahrenen Szenen entsprechen den Typen  $p\_lon\_v_{ego\_0\_m}$  und  $p\_lat\_v_{ego\_v_{ped\_l/m/r}}$ <sup>64</sup>. Die geringen Warnzeiten für die Fußgängergeschwindigkeit  $v_{ped} = 10 \text{ km/h}$  sind hier mit der Geometrie der Testanlage zu erklären. Da die Anlage seitlich begrenzt ist, wird der Dummy erst relativ spät in Bewegung gesetzt, um mit  $10 \text{ km/h}$  auf Kollisionskurs mit dem Fahrzeug zu gelangen.

<sup>62</sup>Das Ziel an dieser Stelle bestand darin, den am besten geeigneten Ansatz in Kombination mit der eingesetzten Sensorik zu ermitteln.

<sup>63</sup>Die Testanlage wurde freundlicherweise im Rahmen des ögP AKTIV von der AUDI AG für Tests zur Verfügung gestellt.

<sup>64</sup>Der Anprallpunkt schwankte durch die nicht ganz exakt eingehaltene Fahrzeuggeschwindigkeit leicht. Die Bewegung des Dummys wurde durch eine Lichtschranke ausgelöst.



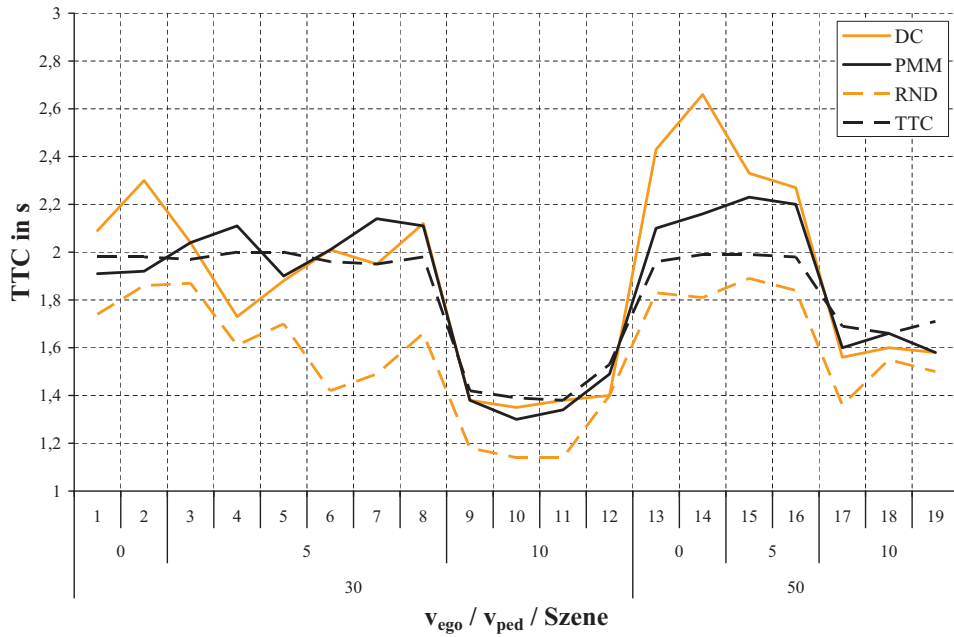


Abbildung 5.6: Ergebnisse der SIT-Ansätze für Eskalationsstufe  $W$  in realen, positiven Szenen

Daher können alle Ansätze in diesen Szenen erst später reagieren (vergleiche auch die beschleunigten Szenen in Abbildung 5.3). Die Ergebnisse in den übrigen Szenen stimmen recht gut mit den Erwartungen aus der Simulation überein. Der  $TTC$ -Ansatz erreicht erneut fast konstante Warnzeiten<sup>65</sup> und auch der  $PMM$  liefert gute Ergebnisse. Die beiden stochastischen Ansätze fallen wie zuvor durch teils große Schwankungen in den Warnzeiten in sehr ähnlichen Szenen auf. Auffällig ist zum Beispiel das sehr hohe Ergebnis des  $DC$ -Ansatzes in Messung 14 oder das vergleichsweise geringe Ergebnis des  $RND$ -Ansatzes in Messung 6. Die Ergebnisse für die Eskalationsstufe  $EB_1$  in denselben Szenen sind in Abbildung 5.7 dargestellt und zeigen ähnlich starke Schwankungen bei den stochastischen Ansätzen. Sowohl der  $TTC$ - als auch der  $PMM$ -Ansatz liefern hier erneut gute Ergebnisse.

### 5.4.2 Negative Szenen

Die Leistung der Ansätze in negativen Szenen wurde in sogenannten Absicherungsfahrten untersucht. Hierfür wurden Innenstadtfahrten mit dem Versuchsfahrzeug unternommen und die Rohdaten der Sensorik (Videobilder) sowie Fahrzeugdaten aufgezeichnet. Diese Daten konnten anschließend mit den verschiedenen Ansätzen nachsimuliert werden (siehe Abschnitt 5.2), um die Anzahl der theoretisch aufgetretenen Fehlauflösungen zu überprüfen.

<sup>65</sup>Diese sind mit realen Sensordaten nicht konstant, da es zu Messunterschieden von Szene zu Szene kommt.

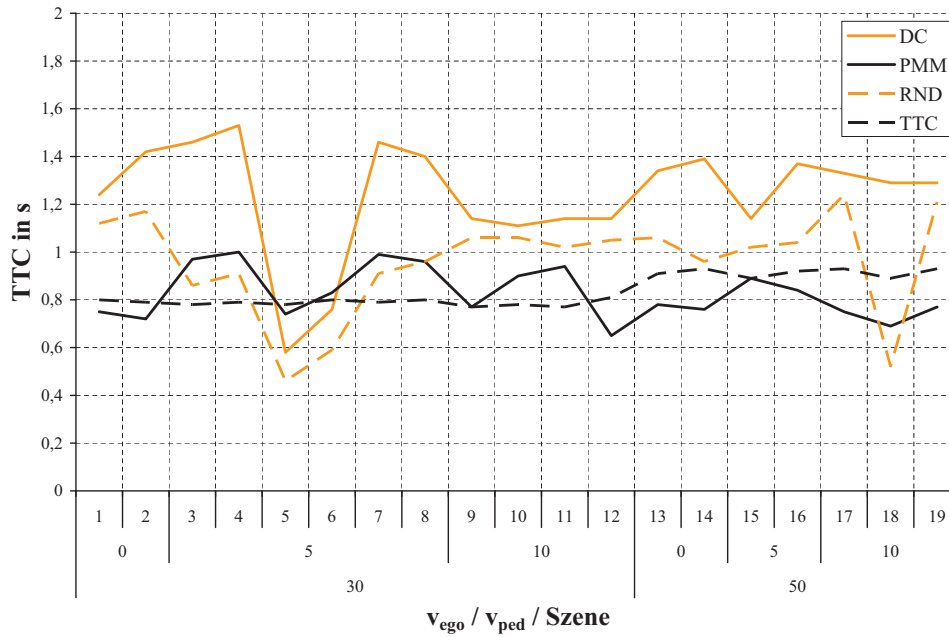


Abbildung 5.7: Ergebnisse der SIT-Ansätze für Eskalationsstufe  $EB_1$  in realen, positiven Szenen

Im Gegensatz zu den simulierten Szenen wurden hier keine Szenen untersucht, in denen Fußgänger beispielsweise knapp die Fahrbahn überqueren, da solche Szenen zum einen potenziell gefährlich für die Versuchspersonen sind, zum anderen ist nicht bekannt, wie häufig eine solche Szene im realen Straßenverkehr tatsächlich auftritt. Aus diesen Gründen wurden die Absicherungsfahrten durchgeführt, um die Leistung der Ansätze im (nachsimulierten) realen Einsatz zu testen.

Ein erster Vergleich der Ansätze wurde mittels 7,6 Stunden Stadtfahrt im Großraum Stuttgart durchgeführt. Die Ergebnisse in Form des Auftretens einer Eskalationsstufe pro Stunde sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Es sind hierbei nur die Eskalationsstufen  $PW$  und  $W$  aufgetreten. Die Objekte, die zu diesen Auslösungen geführt hätten, sind größtenteils sogenannte *False Positives* (FP), d. h. Objekte, die fälschlicherweise als Fußgänger klassifiziert wurden (Szenentyp  $n\_fp$ ). Für die Leistung des Gesamtsystems ist der Umgang mit diesen von sehr hoher Bedeutung, da sie im Allgemeinen häufiger auftreten als Szenen mit realen Fußgängern, die zu einer Fehlwarnung führen könnten.

Es lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der Ansätze insgesamt recht ähnlich sind und in derselben Größenordnung liegen. Der  $RND$ -Ansatz weist insgesamt die wenigsten Auslösungen auf, da er, wie im vorigen Abschnitt gesehen, erst etwas später reagiert als die anderen Ansätze. Der  $DC$ - und der  $PMM$ -Ansatz liefern sehr ähnliche Resultate, lediglich der  $TTC$ -Ansatz fällt durch eine etwas höhere Zahl an Auslösungen auf. Insgesamt muss aber auch festgestellt werden, dass die Resultate bei allen Ansätzen in dieser Form noch deutlich zu hoch ausfallen, da es zu mehreren Fehlwarnungen pro Stunde kommen würde. Dies wäre sicherlich zu viel, um vom Fahrer noch akzeptiert zu werden.

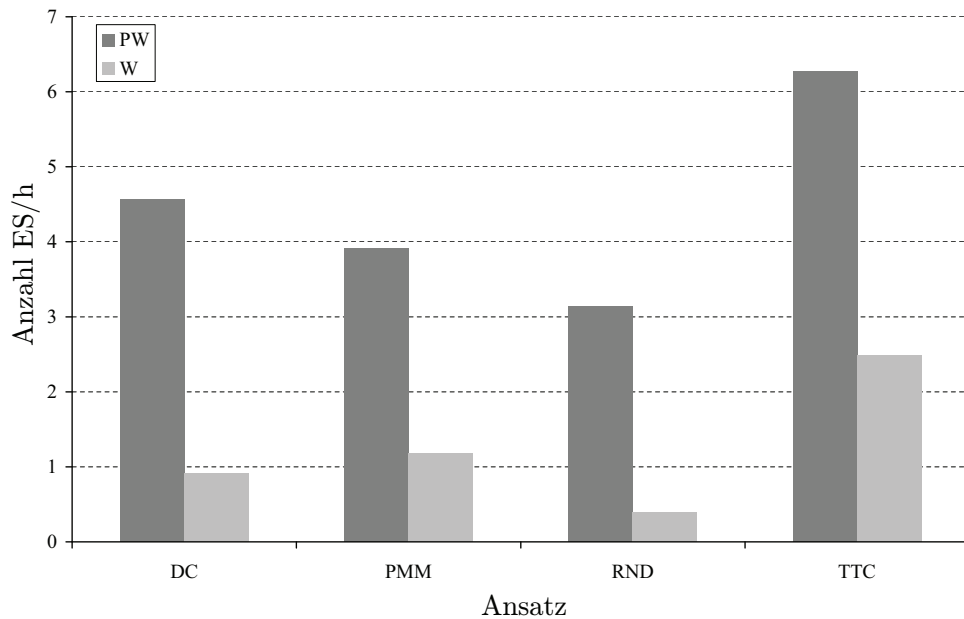


Abbildung 5.8: Ergebnisse der Absicherungsfahrten in Auftreten von Eskalationsstufen pro Stunde

## 5.5 Fazit

Der Vergleich des neu entwickelten *PMM*-Ansatzes mit den anderen Ansätzen hat insgesamt gute Resultate gezeigt. Insbesondere in der Gesamtbetrachtung zeigen sich Vorteile durch die Verwendung des *PMM*-Ansatzes. In positiven Szenen sind ausreichende Warnzeiten sowohl in den simulierten als auch in den realen Szenen, erzielt worden. Dies trifft auch für den *TTC*-Ansatz zu, der darüber hinaus den Vorteil der konstanten Warnzeiten hat, allerdings offenbart dieser deutliche Schwächen in den negativen Szenen (sowohl simuliert als auch im Versuch). Die beiden stochastischen Ansätze weisen in den positiven Szenen sehr stark schwankende Warnzeiten auf und sind daher nur als bedingt geeignet einzustufen. In den negativen Szenen konnte der *RND*-Ansatz vergleichsweise gute Ergebnisse erzielen, dieser bietet dafür allerdings auch die geringsten Warnzeiten aller Ansätze in den positiven Szenen. Der geometrische Ansatz konnte bereits nach der Simulation verworfen werden, da mit diesem Ansatz nur sehr unzuverlässige Ergebnisse möglich waren.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass der *PMM*-Ansatz am besten für eine Fahrerwarnfunktion geeignet ist, die Leistung in den negativen Szenen jedoch in dieser Form noch nicht ausreichend ist. Daher wird im nächsten Kapitel auf das Zusammenspiel der Sensorik und der Situationsanalyse näher eingegangen und untersucht, wie es zu möglichen Fehlauflösungen kommt bzw. wie diese vermieden werden können.



## 6 Fehlermodell

Um die Leistung des Gesamtsystems im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 5 zu verbessern, werden in diesem Kapitel die eingesetzte Sensorik und das Zusammenspiel von Sensorfehlern mit der Situationsanalyse näher untersucht. Dazu werden zunächst das Grundprinzip der eingesetzten Sensorik vorgestellt und mögliche theoretische Fehlerquellen analysiert. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Fehlern und die Untersuchung des Einflusses dieser Fehler auf die Funktion des Gesamtsystems.

### 6.1 Stereo-Video: Grundlagen

Der in dieser Arbeit eingesetzte Sensor ist ein Stereo-Videosystem (auch kurz Stereo-System), welches zum Zeitpunkt der Arbeit im Rahmen des bereits erwähnten öffentlich geförderten Projekts „AKTIV“ entwickelt wurde (siehe auch Branz et al. 2011). In Abbildung 6.1 sind die eingesetzten Kameras sowie der Aufbau im Bosch-Versuchsfahrzeug (BMW E61) dargestellt.

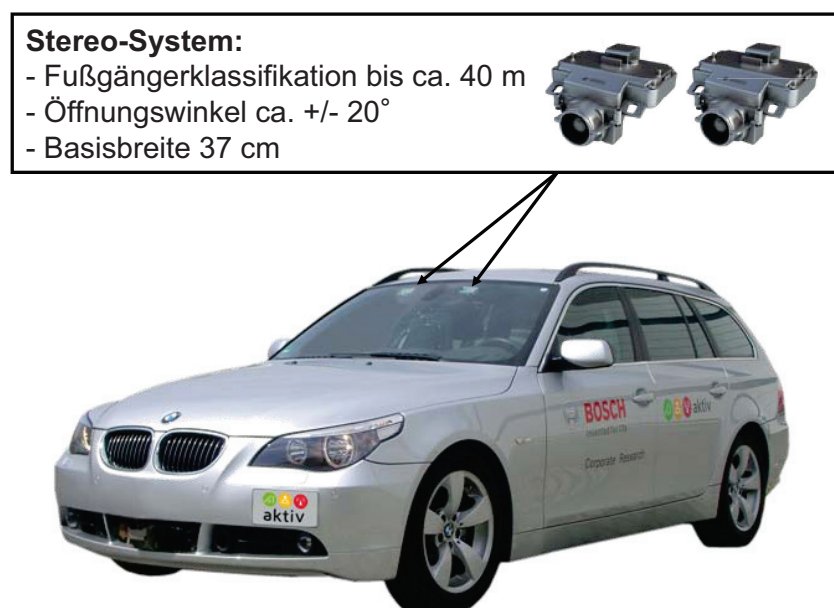


Abbildung 6.1: Das eingesetzte Stereo-System im Bosch-Versuchsfahrzeug (BMW E61)

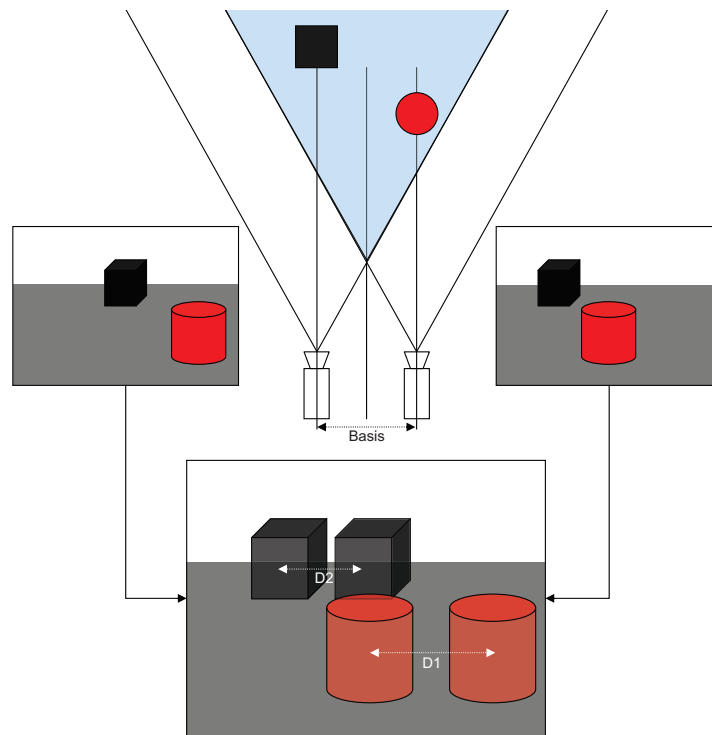


Abbildung 6.2: Prinzip der Entfernungsmessung durch Disparität

Die Kameras sind Bosch CMOS-Kameras<sup>66</sup>, welche für den KFZ-Serieneinsatz produziert werden. Die Auflösung beträgt  $640 \times 480$  Pixel (VGA), die Basisbreite ist mit 37 cm für hohe Reichweiten ausgelegt.

Das Messprinzip des Systems (bzw. eines beliebigen Stereo-Systems) wird an dieser Stelle erläutert, anschließend wird auf die Fußgänger-Klassifikation eingegangen.

### 6.1.1 Messprinzip Stereo-Video

Das Prinzip des maschinellen räumlichen Sehens beruht wie beim Menschen auf einer Verschiebung von Objekten im Bild durch unterschiedliche Perspektiven. Im betrachteten System wird ein Bild simultan von einer linken und einer rechten Kamera aufgenommen, sodass die Unterschiede in den beiden Bildern analysiert werden können. Abbildung 6.2 zeigt dies mit zwei horizontal versetzten Kameras. Die illustrierten Objekte sind sowohl im linken als auch im rechten Kamerabild zu sehen. Überlagert man nun diese beiden Bilder, lässt sich aus der Verschiebung der Objekte auf deren Entfernung von den Kameras schließen. Die Verschiebungen  $D1$  und  $D2$  werden in diesem Zusammenhang auch *Disparitäten* genannt und gewöhnlich in Pixel angegeben. In diesem Fall ist  $D1 > D2$ , da der rote Zylinder näher an den Kameras positioniert ist als der schwarze Würfel. Das

<sup>66</sup>Complementary Metal Oxide Semiconductor

Berechnen der Disparitäten setzt voraus, dass zu einem Pixel oder einem Objekt in einem Bild das korrespondierende Pixel oder Objekt im anderen Bild gefunden werden kann. Dies geschieht durch sogenannte *Matching*-Verfahren, die nach korrespondierenden Pixeln oder Blöcken von Pixeln in beiden Bildern suchen. Für eine Übersicht über verbreitete Matching-Verfahren siehe zum Beispiel (Morales et al. 2009; Klette et al. 2009; Shashua et al. 2010). Falls sich beide Kamerabilder nur durch eine horizontale Translation unterscheiden, ist es hierbei möglich, zeilenweise nach korrespondierenden Pixeln zu suchen.

Sind die korrespondierenden Pixel links und rechts bekannt, kann durch Triangulation für jedes Pixel eine Entfernung berechnet werden (Stiller et al. 2009). Hierfür ist eine möglichst genaue Kenntnis der Pose<sup>67</sup> der beiden Kameras zueinander erforderlich, da sich diese im Allgemeinen nicht nur durch eine horizontale Translation unterscheiden, sondern möglicherweise durch Translationen in mehrere Richtungen sowie Rotationen. Um die für die Berechnung von Disparität und Triangulation benötigten Parameter zu bestimmen, müssen die Kameras daher vorher kalibriert werden. Anschließend können die Bilder vor dem Matching rektifiziert werden, um die Verschiebungen (außer horizontal) und Verdrehungen zu korrigieren. Es sind hierbei eine Reihe von Kalibrierverfahren möglich. Meist werden dabei mehrere Bilder von geometrisch exakt bekannten Objekten aufgenommen, sodass die entsprechenden Rotations- und Translationsparameter bestimmt werden können (für Beispiele siehe Weng et al. 1992; Wei und Ma 1994; Li et al. 2003).

### 6.1.2 Fußgänger Klassifikation

Bei dem in dieser Arbeit eingesetzten Stereo-Videosystem werden nach erfolgreichem Matching zunächst Objekte aus Pixeln gleicher oder ähnlicher Disparität gebildet. Diese Objekte, deren Position im Raum bekannt ist, werden anschließend vom System klassifiziert, um zu entscheiden, ob es sich bei ihnen um Fußgänger handelt. Diese Klassifikation wird rein auf Basis eines Kamerabildes durchgeführt und ist daher auch in Mono-Videosystemen anwendbar.

Für die eigentliche Fußgänger-Klassifikation müssen zunächst Gebiete im Bild selektiert werden, in denen ein Fußgänger vermutet wird, die sogenannten *Regions of Interest* (ROI). Ein großer Vorteil des eingesetzten Stereo-Systems ist, dass bereits bekannt ist, wo im Bild Objekte bestimmter Größe und Form zu sehen sind, sodass nur diese als ROI ausgewählt werden müssen. Bei einem Mono-System werden im Allgemeinen wesentlich mehr ROI generiert, zum Beispiel durch den *Sliding-Window*-Ansatz (siehe auch Schiele und Wojek 2009). Bei dieser Methode werden Fenster sukzessive über das Eingabebild bewegt, der entsprechende Bildausschnitt wird als ROI hinzugefügt und der Inhalt klassifiziert.

---

<sup>67</sup>Die Pose meint die Position und Orientierung.

Die Klassifikation eines Bildausschnitts geschieht meist durch angelernete Klassifikatoren wie *AdaBoost* oder *Support-Vektor-Maschinen* (für eine Übersicht über verschiedene eingesetzte Verfahren siehe auch Hörnlein 2010). Hierbei können auch komponentenbasierte Klassifikatoren zum Einsatz kommen, mit denen bestimmte Körperregionen (Kopf, Rumpf, Beine) von Fußgängern einzeln klassifiziert werden, um dann bestimmen zu können, ob es sich insgesamt um einen Fußgänger handelt. Durch solche Verfahren ist es theoretisch möglich, nur teilweise sichtbare Fußgänger zu erkennen. Ein solches Verfahren kam auch im dem eingesetzten Stereo-Videosystem zum Einsatz (siehe auch Branz et al. 2011).

Die Leistung der Klassifikation ergibt sich aus einer Abwägung zwischen der Erkennungsleistung und der Fehl-Erkennung. In (Shashua et al. 2004) wird beispielsweise eine Erkennungsleistung von 90 % bei einer Fehl-Erkennung von 5,5 % beschrieben. Das bedeutet, dass zwar 90 % der Fußgänger im Testdatensatz korrekt erkannt wurden, jedoch alle 18 ROI ein FP (False Positive) aufgetreten ist. Als FP wird hierbei die Ausgabe des Klassifikators verstanden, dass im untersuchten Bildausschnitt ein Fußgänger erkannt wurde, obwohl sich dort kein Fußgänger befindet. Bei 75 ROI pro Einzelbild (Shashua et al. 2004) ergeben sich bei einer Wiederholrate von 10 Hz dadurch etwa 2500 FP pro Minute oder  $10^6$  pro Stunde.<sup>68</sup>

In dem hier eingesetzten Stereo-System wurde u. a. aufgrund der geringeren Anzahl an ROI eine deutlich geringere Zahl FP erreicht (siehe Abschnitt 6.2).<sup>69</sup>

### 6.1.3 Fehlerquellen

In diesem Abschnitt werden die theoretischen Fehlerquellen des Stereo-Videosystems vorgestellt und analysiert, wie diese modellierbar sind. Hierbei ist anzumerken, dass in der Folge nicht auf die Erkennungsleistung des Systems eingegangen wird, sondern auf Fehler, die bei Erkennung auftreten. Video-Systeme können in ihrer Erkennungsleistung beispielsweise bei Nacht eingeschränkt sein.<sup>70</sup> Andere Sensoren sind hierdurch nicht beeinträchtigt (beispielsweise Radar-Sensorik), können jedoch Nachteile bei der Klassifikation aufweisen. Für eine Übersicht verschiedener Sensorsysteme sowie ihrer Vor- und Nachteile, siehe (Gandhi und Trivedi 2007).

---

<sup>68</sup>Die stabilisierende Wirkung eines möglichen Trackings wurde nicht berücksichtigt.

<sup>69</sup>Das Auftreten von FP allein reicht nicht aus, um ein klassifizierendes System insgesamt zu bewerten. Die Anzahl von FP kann durch verschiedene Parameter gesenkt werden, wodurch allerdings auch die Erkennungsleistung sinkt. In Abschnitt 6.2 wird für eine feste Parametrierung lediglich das Auftreten von FP untersucht.

<sup>70</sup>Dies kann zu verspäteten Reaktionen des Systems führen.



## Quantisierungsfehler

Da die Kameras in einem Stereo-System nur eine endliche Auflösung besitzen, wird jedes Objekt bei der Projektion auf die Bildebene der Kameras entsprechend auf diskrete Pixel abgebildet. Bei größeren Entfernungen oder schmalen Objekten kann dies einen deutlichen Unterschied in der ermittelten Position des Objekts ausmachen, da die berechnete Disparität nur ganzzahlig ermittelt werden kann. Eine einzelne Disparitätsstufe kann bei größerer Entfernung (und damit kleinem Disparitätsniveau) einen Entfernungsunterschied von bis zu einem halben Meter betragen. Eine Möglichkeit, mit diesem Problem umzugehen (ohne die Auflösung der Kameras zu erhöhen), ist die sogenannte *Sub-Pixel*-Schätzung. In (Donate et al. 2008) wird beispielsweise ein Ansatz zur bilinearen Interpolation der gefundenen Korrespondenzen im Bild beschrieben. Durch eine solche Sub-Pixel-Schätzung kann der Quantisierungsfehler deutlich verringert werden.

Um die Größenordnung und die Art des Fehlers näher zu beschreiben, wird in (Miura und Shirai 1997) und (Belhaoua et al. 2010) untersucht, wie sich die Quantisierung auf die Rekonstruktion von vertikalen Linien im Bild auswirkt. In (Miura und Shirai 1997) wird der Fehler als normalverteilt angenommen, da davon ausgegangen wird, dass es sich um die Summe von unabhängigen und gleich verteilten einzelnen Fehlern handelt.<sup>71</sup> In (Belhaoua et al. 2010) wird diese Annahme zwar nicht getroffen, die Ergebnisse des Fehlers im Vergleich mit einer Referenzposition deuten jedoch ebenfalls auf einen normalverteilten Fehler hin. In (Blostein und Huang 1987) wurde einige Jahre zuvor bereits der Quantisierungsfehler für einzelne Punkte untersucht. Unter der Annahme, dass die tatsächliche Lage eines Punktes gleichverteilt in dem Bereich ist, welcher auf denselben Bereich im Bild projiziert wird, wurden hier Wahrscheinlichkeitsdichten für den zu erwartenden Fehler bestimmt. Diese sind allerdings nicht normalverteilt, sondern linear in der Disparität (für den Entfernungsfehler). In (Matthies und Shafer 1987) wird die Verteilung des realen Punktes als Normalverteilung angenommen und der Fehler in der 3D-Position entsprechend als eine 3D-Gaussverteilung.<sup>72</sup>

Insgesamt kann festgestellt werden, dass in der Literatur mehrere Möglichkeiten genannt werden, den Quantisierungsfehler zu modellieren, aber auch, dass er in fast allen Experimenten vergleichsweise gering<sup>73</sup> ausfällt. Da das vorliegende Stereo-System eine Sub-Pixel genaue Schätzung benutzt, kann der Fehler an dieser Stelle fast vernachlässigt werden, bzw. implizit mitmodelliert werden.

---

<sup>71</sup>Die einzelnen Fehler sind hier die Positionen der Punkte der Linie.

<sup>72</sup>Dies ist insofern eine Vereinfachung, als dass die Triangulation keine lineare Operation ist.

<sup>73</sup>Im Vergleich zur Anwendung in dieser Arbeit.

## Kalibrierungsfehler

Das Messprinzip des Stereo-Videosystems beruht auf einer genauen Kenntnis der Geometrie der beiden Kameras zueinander. Wie eingangs beschrieben, werden die Bilder vor der Korrespondenzsuche rektifiziert, um eine Geometrie zu erhalten, in der sich die Bilder nur durch eine horizontale Translation unterscheiden (auch *Epipolarometrie* genannt).

Die Bestimmung der geometrischen Parameter geschieht mithilfe von Kalibrierverfahren, diese können jedoch ebenfalls fehlerbehaftet sein. Wenn die Kameras durch äußere Einflüsse gegeneinander verschoben werden, spricht man von einem *dekalibrierten* System. Bei einer zu starken Störung kann dies dazu führen, dass die Korrespondenzanalyse (das Matching) keine entsprechenden Korrespondenzen mehr findet, sodass der Sensor im Prinzip „blind“ ist. Bei einer schwächeren Dekalibrierung werden noch Objekte erkannt, die Triangulation geschieht aber mit falschen Parametern, sodass die Berechnung der 3D-Position fehlerhaft ist. Die Höhe dieses Fehlers hängt wesentlich von dem Grad der Dekalibrierung ab. Sie kann bei einem kalibrierten System teilweise nach oben abgeschätzt werden (siehe Tsai 1987). In (Dang 2007) wird eine Methode zur Selbst-Kalibrierung eines Stereo-Systems vorgestellt, die im praktischen Einsatz den Fehler durch Dekalibrierung minimieren kann. In diesem Zusammenhang wurden auch die Einflüsse verschiedener Kalibrierungsparameter auf die 3D-Rekonstruktion untersucht. Es zeigt sich, dass Fehler mit zunehmender Entfernung des Objekts für mehrere Parameter quadratisch ansteigen.

Der Fokus dieses Kapitels liegt auf dem Einfluss von Sensorfehlern auf die Situationsanalyse. Durch eine mögliche Selbst-Kalibrierung oder regelmäßige manuelle Kalibrierung kann der Einfluss des Kalibrierfehlers minimiert werden, sodass an dieser Stelle auf eine weitere Erörterung verzichtet wird.

## Störungsfehler

Es existieren vielfältige weitere Fehlerquellen für ein Stereo-System, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail erläutert werden können. Eine Auswahl der Wichtigsten wird jedoch an dieser Stelle beschrieben. Fehler können bereits bei der Aufnahme der Bilder auftreten, da nicht alle Pixel eines Bildes gleichzeitig aufgenommen werden, sondern üblicherweise zeilenweise. Dies kann bei einer schnell bewegten Szene zum sogenannten *Rolling-Shutter-Effekt* führen. Dadurch können schnell bewegte Objekte im Bild verzerrt dargestellt werden. Darüber hinaus können Helligkeitseffekte, Unschärfe oder anderes Rauschen dazu führen, dass die Auswertung der Bilder fehlerhaft ist. Selbstverständlich kann auch das Matching-Verfahren selbst fehlerhaft sein. Im schlimmsten Fall können periodische Strukturen im Bild dazu führen, dass das Matching-Verfahren nicht vorhandene Objekte vor das Fahrzeug projiziert. In (Morales et al. 2008) und (Morales

et al. 2009) wurden verschiedenen Stereo-Matching-Verfahren mit synthetischen Bildern getestet. Es stand daher die exakte Ground Truth (in Disparität pro Pixel und Bild) zur Verfügung, sodass eine Evaluation der verschiedenen Verfahren unter unterschiedlichen Bedingungen möglich war. Die synthetischen Bilder wurden dabei im Originalzustand sowie mit drei künstlichen Modifikationen getestet. Dies beinhaltet eine Veränderung der Helligkeit, der Schärfe der Bilder sowie eine künstliche Verrauschung durch ein normalverteiltes Rauschen. Dabei wurde jeweils die berechnete Disparität pro Pixel und Bild mit der bekannten Disparität aus der Ground Truth verglichen. Als Maß für die Abweichung wurde der *root mean square* (*RMS*) Fehler betrachtet:

$$R(t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x \in \Omega} [d(x, t) - d^*(x, t)]^2}. \quad (6.1)$$

In (6.1) bezeichnet  $d(x, t)$  die berechnete Disparität bei Pixel  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  und entsprechend  $d^*$  die Disparität der Ground Truth. Das Bild wird durch  $\Omega$  repräsentiert und besteht hier aus  $N$  Pixeln. Die Ergebnisse zeigten, dass manche Matching-Verfahren bereits mit den Originalbildern deutliche Abweichungen zur Ground Truth aufweisen (bis zu  $R(t) = 20$  Pixel bei einer Bildbreite von 640 Pixel). Für die Helligkeitsmodifikation, welche im linken und rechten Bild unterschiedlich aufgeprägt wurde, wurden *RMS*-Fehler bis 45 Pixel erreicht. Ein Fehler in der Disparität dieser Größenordnung kann (je nach Entfernung des Objekts) zu großen Fehlern in der 3D-Positionierung führen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die hier unter dem Störungsfehler betrachteten Einflüsse sehr vielfältig sind und je nach Art einen großen Einfluss auf das Stereo-System haben können. Eine detaillierte Modellierung der verschiedenen Fehler und Einflüsse ist allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird in der Form auch nicht verfolgt. Vielmehr scheint die Modellierung des Fehlers als Summe vieler Einzelfehler praktikabel und für den Nutzen in der Situationsanalyse sinnvoll (siehe Abschnitt 6.3).

## Klassifikation

Es gibt prinzipiell zwei Fehler-Arten eines klassifizierenden Systems. Zum einen die bereits angesprochenen FP und die *False Negatives* (FN). Als FP wird dabei die Aussage des Systems verstanden, einen Fußgänger erkannt zu haben, ohne dass sich an der fraglichen Position tatsächlich ein Fußgänger befindet. Entsprechend meint ein FN die Nicht-Erkennung eines im Bild vorhandenen Fußgängers. Die entsprechenden Raten (FP bzw. FN pro Stunde) werden dabei normalerweise Einzelbild- oder trajektorienbasiert angegeben. Bei der Angabe auf Basis von Einzelbildern werden die Größen in jedem Bild gezählt und üblicherweise als Gesamtzahl pro Stunde angegeben. Für die Situationsanalyse relevanter ist die Angabe auf Trajektorienbasis. Hier wird ein FP anhand der vom

Sensor vergebenen Objekt-ID gezählt. Das heißt, ein FP, der für mehrere Einzelbilder auftritt, wird nur als ein Objekt und ein FP gezählt.<sup>74</sup> Entsprechend erfolgt die Angabe der FN für einen im Bild befindlichen Fußgänger im zeitlichen Verlauf ebenfalls nur einmal.

Da der eingesetzte Klassifikator auf Lernverfahren basiert (siehe auch Hörnlein 2010), kann es passieren, dass er in einem Bildausschnitt (ROI) einen Fußgänger erkennt, welcher dort in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Dies tritt insbesondere dann auf, wenn im Bildausschnitt ein fußgängerähnliches Objekt zu sehen ist. Ein typisches FP-Objekt kann beispielsweise eine Baustellenbake mit Warnleuchte sein. Ein solches Objekt ähnelt in den Konturen einem Oberkörper mit Kopf aus der Seitenansicht. Auch andere Objekte, die anschaulich weniger Ähnlichkeit mit einem Fußgänger haben, können in der Auswertung fußgängerähnliche Merkmale aufweisen und so zu FP führen. Im Kontext der Fahrerwarn- oder Bremsfunktion stellt ein FP, das zumindest durch ein reales Objekt hervorgerufen wurde, allein noch kein großes Problem dar. Die meist statischen Objekte befinden sich nicht auf Kollisionskurs mit dem Fahrzeug.<sup>75</sup> Durch weitere Fehler in der Messung der 3D-Position oder der Geschwindigkeit können FP allerdings problematisch für die Funktion werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ein FP auf einem realen Objekt „wandert“. Das bedeutet, dass bestimmte Strukturen eines beispielsweise stehenden Objekts als Fußgänger erkannt werden und durch die Blickwinkeländerung während der Fahrt die Struktur auf dem Objekt „mitwandert“. Für solche FP ist eine korrekte 3D-Positionierung oder Geschwindigkeitsangabe nicht möglich, da das Objekt an sich nicht definiert ist.

Das Auftreten von FN, also der Nicht-Erkennung von Fußgängern, ist ebenso schwierig vorherzusagen und kann in der Funktion zu Nutzenverlust in kritischen Szenen führen. Eine verspätete Erkennung eines gefährdeten Fußgängers führt beispielsweise dazu, dass die Warnung eventuell nicht mehr rechtzeitig ausgegeben werden kann.

Aufgrund der hohen Relevanz der FP für die Akzeptanz<sup>76</sup> einer Warn- und Bremsfunktion wird das Auftreten der FP im nächsten Abschnitt genauer analysiert.

---

<sup>74</sup>Solange das Objekt im Bild ist oder die Objekt-ID wechselt.

<sup>75</sup>Andernfalls wäre eine Warnung vor einem Fußgänger zwar unberechtigt, aber eine generelle Warnung eventuell angebracht.

<sup>76</sup>Ein Fahrer akzeptiert eine Fehlwarnung vermutlich eher, wenn sie von einem echten Fußgänger ausgelöst wurde anstatt von einem unbewegten Objekt.

## 6.2 Stereo-Video: Praxis

In diesem Abschnitt wird zunächst das eingesetzte Stereo-System beschrieben sowie dessen Leistung detailliert betrachtet, um die Auswirkungen in der Situationsanalyse besser verstehen und ein geeignetes Fehlermodell ableiten zu können. Das Fehlermodell wird anschließend in einem Simulationsframework (siehe Anhang B) genutzt, um die genauen Anforderungen an die Sensorik zu analysieren, welche sich durch Funktion ergeben.

### 6.2.1 Referenzierung

Um die Leistung eines beliebigen Sensorsystems bewerten zu können, wird eine Vergleichsbasis oder Referenz benötigt. Diese Referenz muss zugunsten eines sinnvollen Vergleichs die tatsächliche Ground Truth möglichst gut approximieren. Zu diesem Zweck wurden in dieser Arbeit drei verschiedene Sensoren benutzt, sodass ein ausreichender Quervergleich möglich war.

#### Laserscanner

Die primär genutzte Vergleichssensorik war ein Laserscanner (IBEO Alasca-XT). Dieser wurde im Versuchsträger zusätzlich verbaut und stellte in jeder gefahrenen Szene entsprechende Vergleichsdaten bereit. Die Auflösung dieses Sensors liegt im Bereich von  $0,25^\circ$  bei einer Scanfrequenz von 25 Hz.<sup>77</sup> Damit ist eine Positionsbestimmung sehr genau<sup>78</sup> möglich. Für den Vergleich mit dem Stereo-System wurde in der Position der Schwerpunkt des Polygonzug-Objekts, das der Laserscanner auf Objektebene liefert, berechnet, um so die Positionsgenauigkeit bzw. die Stabilität der Werte zu erhöhen. Die Güte der Positionsdaten kann daher als ausreichend hoch angesehen werden. Die vom Laserscanner gelieferten Geschwindigkeiten sind hingegen teilweise stark gefiltert, sodass die Daten bei beschleunigten Bewegungen höhere Abweichungen aufweisen.<sup>79</sup>

#### VBox

Die in den Probandentests (Kapitel 4) eingesetzte VBox wurde ebenfalls für einen Vergleich herangezogen. In diesem Fall wurde insbesondere die vom Stereo-System bestimmte Geschwindigkeit mit der von der VBox gemessenen Geschwindigkeit verglichen.

---

<sup>77</sup>Im Bereich von  $\pm 16^\circ$  (nach vorne) danach wird eine Auflösung von  $0,5^\circ$  erreicht.

<sup>78</sup>Für diesen Sensor gab es keine spezifizierte Angabe. Die Genauigkeit des Nachfolgesensors, IBEO Lux ist in der Distanz mit einer Genauigkeit von 10 cm angegeben (bei einer Distanz-Auflösung von 4 cm).

<sup>79</sup>Dies wurde insbesondere im Vergleich mit den anderen eingesetzten Sensoren deutlich.

## **Fußgänger Testanlage**

Die in Kapitel 5 bereits erwähnten Testszenen mit einem Fußgängerdummy konnten ebenfalls für die Sensorik-Evaluation benutzt werden. Die Testanlage der AUDI AG in Neustadt ermöglicht nicht nur, den Dummy kurz vor einer Kollision sicher nach oben wegzuziehen, sondern darüber hinaus die genauen Positionsdaten des Dummys relativ zum Fahrzeug per Funk an das Fahrzeug zu übermitteln. Die Positionsdaten des Fahrzeugs werden dazu mit einem dGPS (differential GPS) System sehr genau bestimmt. Die Position des Dummys relativ zur eingemessenen Brücke wird über die Position der eingesetzten Schrittmotoren ermittelt und zusammen mit abgeleiteten Geschwindigkeitswerten an das Fahrzeug gesendet.

## **Testszenen**

Die Attributgüten des Stereo-Systems wurden in vielen verschiedenen Szenen getestet und evaluiert. Bei den meisten Szenen standen als Referenz die Daten des Laserscanners zur Verfügung. Eine Auswertung aller Szenen führt an dieser Stelle zu weit, weswegen der Fokus im Folgenden auf der Auswertung der Szenen auf der Testanlage liegt, bei der zusätzlich zum Laserscanner die mittels dGPS ermittelten Referenzdaten der Testanlage zur Verfügung standen. Es hat sich gezeigt, dass diese Daten insbesondere bei der Geschwindigkeit eine höhere Qualität als die des Laserscanners aufweisen.

### **6.2.2 Vorgehen**

Die Auswertung der Daten in den verschiedenen Testszenen wurde nach Aufnahme der Szene offline durchgeführt. Hierzu wurden die Daten der Sensoren (Stereo-Video, Laserscanner und Referenzdaten der Anlage) analysiert und die verschiedenen Attribute (Position und Geschwindigkeit jeweils longitudinal und lateral) untereinander verglichen. Dazu wurden zunächst die Daten der Testanlage als Referenz für die anderen Sensoren definiert. Da jeder Sensor unterschiedliche Zykluszeiten aufweist, wurde für die Daten des Referenzsensors eine Ausgleichskurve berechnet, mit der die Daten der anderen Sensoren anschließend verglichen wurden. In der Folge werden beispielhaft einige der so erhaltenen Ergebnisse beschrieben.

### **6.2.3 Attributgüten**

Die Bewertung des Stereo-Systems erfolgt anhand der Objektschnittstelle, welche die Eingangsebene der Situationsanalyse darstellt. Zur Evaluierung der Positions- und Geschwindigkeitsdaten bzw. deren Güte werden die folgenden Abkürzungen benutzt:

- $dx$ : longitudinaler Abstand relativ zur Fahrzeug-Front,
- $dy$ : lateraler Abstand relativ zur Fahrzeug-Mitte,
- $vx$ : longitudinale Geschwindigkeit des Objekts absolut,
- $vy$ : laterale Geschwindigkeit des Objekts absolut,
- $\Delta dx$ : Differenz von  $dx$  Sensor zu  $dx$  Referenz,
- $\Delta dy$ : Differenz von  $dy$  Sensor zu  $dy$  Referenz,
- $\Delta vx$ : Differenz von  $vx$  Sensor zu  $vx$  Referenz,
- $\Delta vy$ : Differenz von  $vy$  Sensor zu  $vy$  Referenz.

Als Referenz wurden jeweils die Daten der Testanlage ausgewählt und die Daten der anderen Sensoren, wie beschrieben, darauf bezogen.

In der ersten betrachteten Szene war der Dummy unbewegt, während sich das Fahrzeug mit 30 km/h auf ihn zu bewegte (Szene p\_lon\_30\_0, siehe auch Anhang C). Für  $\Delta dx$  ergeben sich im Durchschnitt Werte von 4 cm beim Laserscanner und 18 cm beim Stereo-System. Die Abweichungen des Stereo-Systems sind insbesondere in größerer Entfernung höher, fallen dann allerdings ab.

Die Abweichungen  $\Delta dy$  schwanken sowohl beim Laserscanner als auch beim Stereo-System leicht, liegen aber im Mittel im Bereich von etwa 10 cm. Dies ist bei einem Objekt von ca. 50 cm Breite in einem akzeptablen Bereich.

In der longitudinalen Geschwindigkeit zeigen die Abweichungen ( $\Delta vx$ ) um den wahren Wert ( $vx = 0$ , da der Dummy stand) deutlich größere Schwankungen als in den Positionsdaten. Dies ist insofern zu erwarten, als dass die Geschwindigkeitsdaten aus den Positionsdaten abgeleitet werden. Die Abweichungen in der lateralen Geschwindigkeit ( $\Delta vy$ ) zeigen für das Stereo-System ein ähnliches Bild. Auch hier ist die Abweichung im Mittel verschwindend gering, es kommt jedoch für den stehenden Dummy zu Schwankungen im Bereich von ca.  $\pm 0,1$  m/s. Die Daten des Laserscanners schwanken mitunter deutlich stärker und sind auch im Mittel ein wenig schlechter.

Insgesamt ist die Güte der Daten in der Szene p\_lon\_30\_0 als hoch zu bezeichnen. Lediglich die leichten Schwankungen in der Geschwindigkeit, insbesondere in  $vy$ , können für die Situationsanalyse und damit für die Gesamtfunktion problematisch sein. Die Ergebnisse in den übrigen Szenen sind in der Position ( $dx, dy$ ) und in der longitudinalen Geschwindigkeit ( $vx$ ) ähnlich. Daher wird im Folgenden nur die laterale Geschwindigkeit für einen bewegten Dummy noch einmal analysiert.

In der Szene p\_lat\_30\_5 wurde der Dummy aus der Ruhelage von der Testanlage auf eine Endgeschwindigkeit von 1,4 m/s (5 km/h) beschleunigt. Das Fahrzeug näherte sich



dem Dummy erneut mit 30 km/h. Sowohl der Laserscanner als auch das Stereo-System zeigen hier einen leichten zeitlichen Verzug von etwa 0,2 s und laufen dem Signal der Referenz damit nach. Der Laserscanner zeigt daneben ein deutliches „Überschwingen“ von ca. 0,4 m/s beim Erreichen der Endgeschwindigkeit. Dies resultiert aus der bereits angesprochenen zeitlichen Filterung der Daten. Die Schwankungen des Stereo-Systems bewegen sich hier in einer ähnlichen Größenordnung wie im vorigen Fall des unbewegten Dummies.

Ähnliche Resultate ergeben sich auch in der Szene (p\_lat\_50\_10), in der der Dummy eine höhere Endgeschwindigkeit (2,8 m/s oder 10 km/h) erreicht und die Fahrzeuggeschwindigkeit bei 50 km/h liegt. Auch hier ergibt sich ein zeitlicher Verzug für das Stereo-System und den Laserscanner von etwa 0,2 s und das Überschwingen des Laserscanners tritt auf.

Die übrigen Ergebnisse zeigen insgesamt ein ähnliches Bild. Es bleibt daher festzuhalten, dass die Attribut-Messung des Stereo-Systems in diesen Szenen in einem sehr guten Bereich liegt. Insbesondere bei den Geschwindigkeiten können jedoch Schwankungen auftreten.

Für die Analyse der Auswirkungen auf die Situationsanalyse werden in Abschnitt 6.3 die Schwankungen des Stereo-Systems theoretisch modelliert. Diese haben in den hier vorgestellten Szenen zwar wenig Einfluss auf das Verhalten des Gesamtsystems, können jedoch in Szenen, in denen keine Systemreaktion erwünscht ist, durchaus eine Systemreaktion provozieren.

#### 6.2.4 Klassifikation

Das Auftreten der beschriebenen Klassifikationsfehler des Systems wurde heuristisch durch eine Auswertung von ca. 13 Stunden Stadtfahrt in den Großräumen Stuttgart und Hannover durchgeführt. Hierbei wurden die erkannten Objekte des Systems manuell überprüft, ob es sich tatsächlich um einen Fußgänger handelte oder nicht. An dieser Stelle wurden FN nicht bewertet.

In den 13 ausgewerteten Stunden wurden trajektorienbasiert insgesamt 256 FP festgestellt, d. h. es traten knapp 20 FP-Objekte pro Stunde auf. Angegeben auf Einzelbildbasis ergaben sich knapp 6500 Frames, in denen ein FP zu sehen war und damit etwa 500 pro Stunde. Für jedes Objekt bedeutet dies im Durchschnitt eine Dauer von 25 Frames. In Abbildung 6.3 ist die Position der FP-Objekte beim erstmaligen Auftreten als Punktwolke dargestellt. Die gestrichelte Linie deutet hierbei den Öffnungswinkel des Stereo-Systems an. Es fällt auf, dass knapp 60 % der auftretenden Objekte in einer lateralen Entfernung von zwei bis vier Metern vom Fahrzeug erscheinen. Hierbei entfallen 40 % auf die rechte und entsprechend 20 % auf die linke Seite. Das doppelt so häufige Auftreten rechts ist



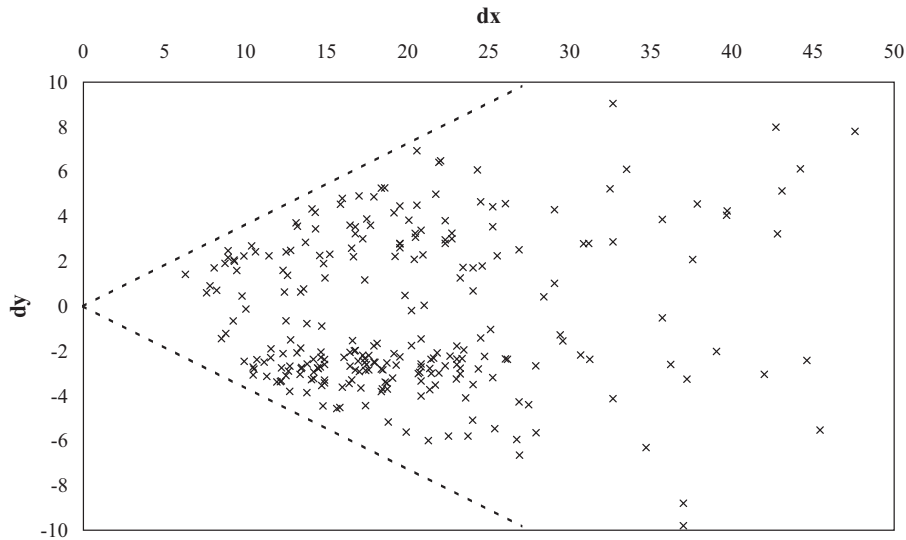


Abbildung 6.3: Punktwolke der Position der FP bei Auftreten

im vorherrschenden Rechtsverkehr begründet. Es wird in diesem Fall deutlich enger an Objekten auf der rechten als auf der linken Seite vorbeigefahren. Dies führt entsprechend eher zu Fehlklassifikationen.

Für Situationsanalyse und Gesamtsystem können insbesondere diese Objekte zu falschen Reaktionen führen, wenn sie zusätzlich noch eine falsche laterale Geschwindigkeit erhalten. Die Situationsanalyse kann dann nicht entscheiden, ob es sich um ein FP-Objekt mit falscher Geschwindigkeit oder einen Fußgänger handelt, der im Begriff ist, auf die Straße zu treten. Aus diesem Grund wird im nächsten Abschnitt das Auftreten der FP-Objekte modelliert und anschließend untersucht, welche Geschwindigkeitsfehler zu falschen Auslösungen führen.

## 6.3 Fehlermodellierung

In diesem Abschnitt werden die Fehler in der Attribut-Messung sowie das Auftreten von FP modelliert. Mittels einer Sensitivitätsanalyse wird untersucht, welche Fehler für das Gesamtsystem kritisch sind und welche Güte die verschiedenen Attribute besitzen müssen, um eine ausreichende Funktionalität des Gesamtsystems zu ermöglichen. Theoretisch betrachtet bedeutet dies die Untersuchung der Fehlwarnrate ( $FWR$ ) in Abhängigkeit der Attributgüten und der Auftretenswahrscheinlichkeit von FP. Sei dazu  $I$  die Menge aller möglichen Szenen, in denen es zu einer Fehlwarnung kommen kann und  $\omega_i$  die relative Häufigkeit der Szene  $i$  in einer repräsentativen<sup>80</sup> Stunde. Die Wahrscheinlichkeit, dass es in der Szene  $i$  zu einer Fehlwarnung kommt, hängt dann von den Attributgüten der

<sup>80</sup>Das bedeutet in diesem Fall einer durchschnittlichen Stunde, in der das System aktiv ist.

Sensorik ab und wird mit  $P_i(\cdot)$  bezeichnet. Das Auftreten eines FP wird in diesem Ansatz über die Gewichtung  $\omega_j$  einer FP Szene  $j$  abgebildet. Die Fehlwarnrate ergibt sich dann als

$$FWR = \sum_{i \in I} \omega_i P_i(\delta_{i,dx}, \delta_{i,dy}, \delta_{i,vx}, \delta_{i,vy}). \quad (6.2)$$

Dabei kann die Fehlerverteilung  $\delta_i$  von der Szene  $i$  und dem jeweiligen Attribut abhängen.

Das Ziel ist nun zunächst Fehlerverteilungen  $\delta_i$  zu finden und anschließend in einer Sensitivitätsanalyse des Systems zu untersuchen, wie stark diese schwanken dürfen, um die in Abschnitt 2.4 aufgestellte Anforderung ( $FWR < 10^{-1} \text{ h}^{-1}$ , siehe (2.3)) zu erfüllen. In der Sensitivitätsanalyse werden dabei durch Simulation der wichtigsten Szenen  $i \in I$  das Verhalten der Wahrscheinlichkeiten  $P_i$  untersucht. Eine vollständige Untersuchung für alle Szenen  $i \in I$  ist bei der unbekannten Anzahl von Szenen und der entsprechenden Gewichtung jedoch nicht möglich. Daher werden für die Sensitivitätsanalyse Szenen ausgewählt, welche zum einen mit einer hohen anzunehmenden bzw. beobachteten Häufigkeit vorkommen und zum anderen ein hohes Fehlwarnpotenzial aufweisen.

### 6.3.1 Attributgüten

In Abschnitt 6.1 wurden potenzielle Fehlerquellen für ein Stereo-Videosystem angesprochen und Ansätze zur Modellierung vorgestellt. Für die Situationsanalyse treten die Fehler in der Objektschnittstelle auf. Daher werden die Fehler an dieser Stelle modelliert. Für Fehler der einzelnen Attribute wird dabei eine stochastische Schwankung um den wahren Wert angenommen, d. h. der Mittelwert der Verteilungen  $\delta_i$  ist Null. Des Weiteren soll der Typ von  $\delta_i$  nicht, wie oben beschrieben, von der Szene  $i$  abhängen, sondern nur vom jeweiligen Attribut. Die Schwankung der Verteilung kann jedoch für verschiedene Szenen unterschiedlich sein. Daher wird sie in der Simulation in einem realistischen Bereich variiert.

Wie im Abschnitt 6.1 beschrieben, wurde bereits in einigen Untersuchungen die Annahme getroffen, dass die Attribut-Fehler normalverteilt sind. Diese Verteilung bietet zusätzlich den Vorteil einer gewissen Generalität. Das Gesamtsystem setzt zwar auf eine Stereo-Videosensorik, die Situationsanalyse könnte jedoch auch zusammen mit anderer Sensorik eingesetzt werden, deren Fehlerverteilung nicht bekannt ist. Aus diesen Gründen wurde untersucht, ob sich die auftretenden Schwankungen in den Attribut-Fehlern des Stereo-Systems mittels einer Normalverteilung hinreichend genau approximieren lassen.

In Abbildung 6.4 sind dazu für drei verschiedene Szenen, welche bereits in Abschnitt 6.2 untersucht wurden, die Fehler  $\Delta dx$  kumulativ aufgetragen. Des Weiteren wurde die Fehlerverteilung jeweils durch eine Normalverteilung mit der Maximum-Likelihood-Methode approximiert. Die untersuchten Szenen sind hierbei wie folgt bezeichnet:

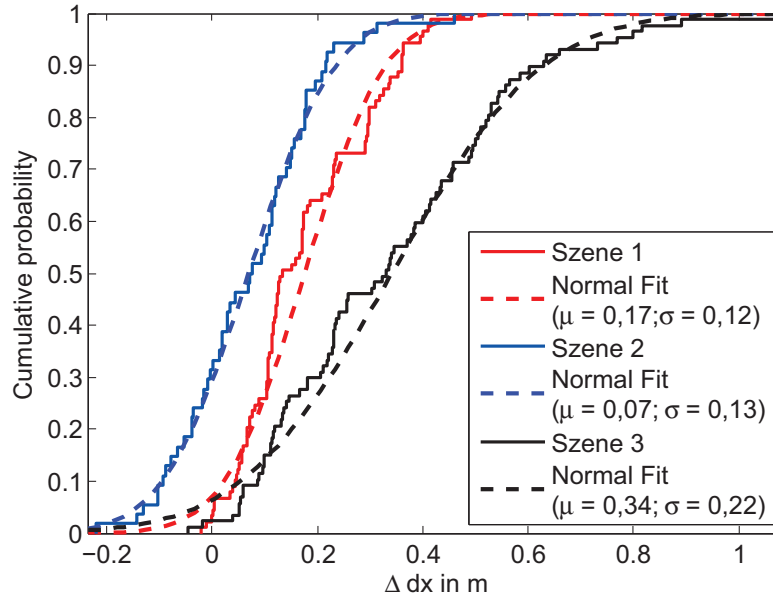


Abbildung 6.4:  $\Delta dx$  kumuliert mit approximierender Normalverteilung in drei verschiedenen Szenen

- Szene 1 (p\_lon\_30\_0): Der Dummy steht, Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h.
- Szene 2 (p\_lat\_50\_10): Endgeschwindigkeit des Dummys 10 km/h , Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h.
- Szene 3 (p\_lat\_30\_5): Endgeschwindigkeit des Dummys 5 km/h, Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h.

Es ist in allen Szenen zu erkennen, dass die Fehlerverteilung durch eine Normalverteilung approximiert werden kann. Die Mittelwerte der Verteilungen sind jeweils leicht positiv, was in der späteren Modellierung allerdings nicht berücksichtigt wird.<sup>81</sup> Die gleiche Darstellung für  $\Delta dy$  findet sich in Abbildung 6.5. Allerdings ist Szene 1 nicht berücksichtigt, da die Werte für  $\Delta dy$  in dieser Szene hauptsächlich zwischen zwei Werten alternieren. In den zwei dargestellten Szenen lässt sich die Verteilung von  $\Delta dy$  gut durch eine Normalverteilung annähern. Die Verteilungen in diesem Fall unterscheiden sich nur leicht durch einen um wenige Zentimeter verschobenen Mittelwert. Die Abweichungen in den Geschwindigkeiten  $\Delta vx$  und  $\Delta vy$  lassen sich ebenfalls ausreichend mittels einer Normalverteilung approximieren. Dies ist in Abbildung 6.6 bzw. 6.7 dargestellt. Die negativen Mittelwerte bei  $\Delta vy$  für Szene 2 und Szene 3 ergeben sich aus der bereits angesprochenen zeitlichen Verzögerung im Vergleich zum Referenz-System. Es kann insgesamt festgestellt werden, dass alle betrachteten Attribut-Fehler in ausreichendem Maße durch eine Normalverteilung angenähert werden können.

<sup>81</sup>Ein konstanter Fehler, hervorgerufen beispielsweise durch eine fehlerhafte Kalibrierung, kann in der Situationsanalyse theoretisch korrigiert werden.

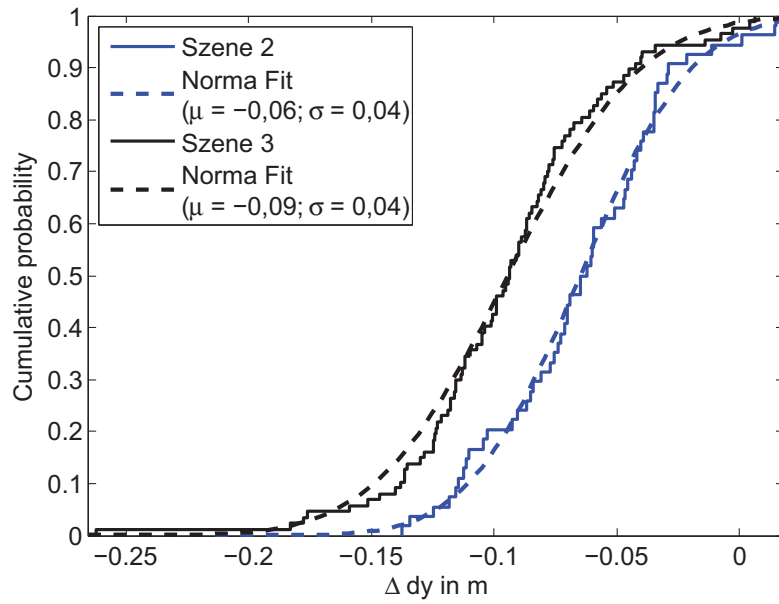


Abbildung 6.5:  $\Delta dy$  kumuliert mit approximierender Normalverteilung in zwei verschiedenen Szenen

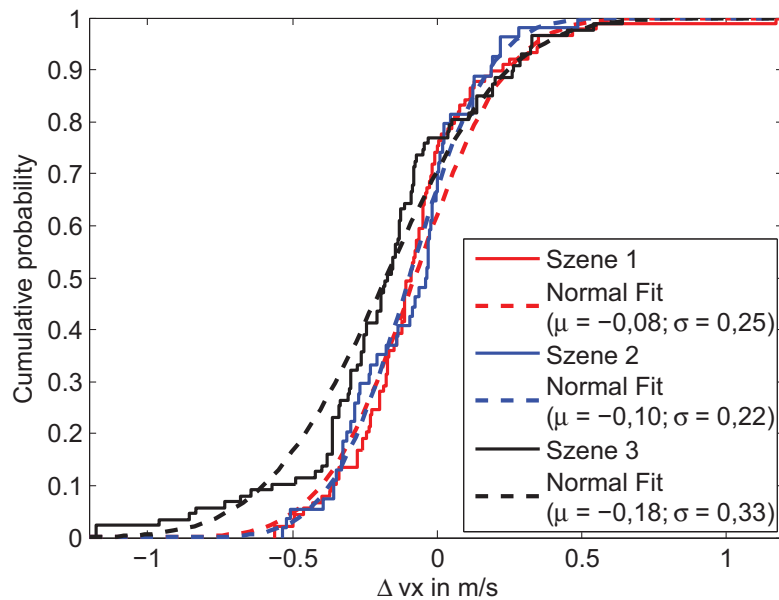


Abbildung 6.6:  $\Delta vx$  kumuliert mit approximierender Normalverteilung in drei verschiedenen Szenen

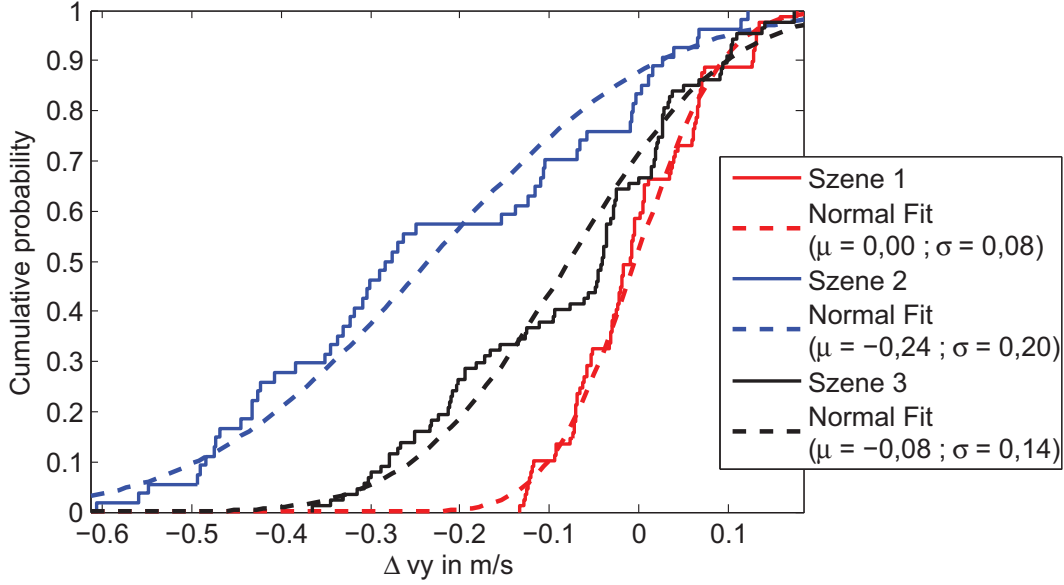


Abbildung 6.7:  $\Delta v_y$  kumuliert mit approximierender Normalverteilung in drei verschiedenen Szenen

Es gibt einzelne Messungen, in denen der Fehler sich anders verhält. Dies sind jedoch insbesondere die, in denen die Fehler nur wenig schwanken und somit kein Problem in der Situationsanalyse darstellen. Dazu muss angemerkt werden, dass die obigen Ergebnisse in den Schwankungen generell eher kleinere Werte aufweisen. Die Messungen fanden hier unter guten Bedingungen für das System statt, unter anderen Bedingungen ist daher eine höhere Schwankung in den Werten möglich. Aus diesem Grund werden auch höhere Werte für die Standardabweichung in der Simulation geprüft. Die in der Simulation eingesetzten Werte zum Zeitpunkt  $t$  ergeben sich nun durch die wahren Werte der Szene (Ground Truth) und einem additiven, normalverteilten Rauschen:

$$\begin{aligned}
 dx_{sim}(t) &= dx^{GT}(t) + \delta_{dx} \\
 dy_{sim}(t) &= dy^{GT}(t) + \delta_{dy} \\
 vx_{sim}(t) &= vx^{GT}(t) + \delta_{vx} \\
 vy_{sim}(t) &= vy^{GT}(t) + \delta_{vy}.
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

Dabei gilt für das additive Rauschen

$$\begin{aligned}
 \delta_{dx} &\sim \mathcal{N}(0, \sigma_{dx}^2) \\
 \delta_{dy} &\sim \mathcal{N}(0, \sigma_{dy}^2) \\
 \delta_{vx} &\sim \mathcal{N}(0, \sigma_{vx}^2) \\
 \delta_{vy} &\sim \mathcal{N}(0, \sigma_{vy}^2).
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

Die Werte der Standardabweichungen werden dabei unabhängig voneinander variiert, um die genauen Anforderungen des Gesamtsystems an die Sensorik zu bestimmen. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass die Unabhängigkeit in diesem Fall eine vereinfachende Annahme darstellt. Die Bestimmung der lateralen Position  $dy$  beispielsweise hängt von der longitudinalen Position  $dx$  ab, da diese über  $dx$  und den Winkel zwischen Sichtachse und Objekt geschieht. Die Geschwindigkeiten in longitudinaler und lateraler Richtung werden im vorliegenden System aus den Positionsdaten abgeleitet und sind daher von den entsprechenden Güten in  $dx$  und  $dy$  abhängig.

### 6.3.2 Klassifikation

Da der Großteil der auftretenden Fehlwarnungen (vergleiche Kapitel 5) von FP ausgelöst wird, sollen diese ebenfalls künstlich modelliert und in einer Sensitivitätsanalyse simuliert werden. Das Auftreten von FP wurde bereits im vorigen Abschnitt kurz beschrieben. Mithilfe der heuristischen Daten aus 13 Stunden Stadtfahrt werden Verteilungen für die verschiedenen charakteristischen Merkmale eines FP gefunden. Im Einzelnen sind dies

- Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$ : Bei welcher Geschwindigkeit des Fahrzeugs treten die FP auf, bzw. welche Geschwindigkeit herrscht im Stadtverkehr vor?
- Position  $(dx, dy)$ : An welcher Stelle treten die FP auf?
- Dauer bzw. Anzahl der Frames  $N_F$ : Wie lange ist ein FP-Objekt sichtbar?

Die Geschwindigkeit der FP-Objekte wird im Mittel als Null angenommen, da es sich meist um statische Objekte handelt. Der Fehler in der Geschwindigkeit wird zusammen mit dem Positionsfehler wie in (6.3) und (6.4) modelliert. Die Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeit bei den auftretenden FP ist in Abbildung 6.8 dargestellt.<sup>82</sup> Es ergibt sich hierbei eine mittlere Geschwindigkeit von etwa 28 km/h mit einer Standardabweichung von 9,6 km/h. In der Simulation wird die Fahrzeuggeschwindigkeit normalverteilt mit diesen Parametern modelliert. Ebenfalls als normalverteilt wird das erstmalige Auftreten eines FP in der Entfernung  $dx$  betrachtet. Wie in Abbildung 6.9 zu sehen ist, kann der Verlauf der  $dx$ -Werte ausreichend gut durch eine Normalverteilung angenähert werden.

---

<sup>82</sup>Es wurden hierfür nur FP berücksichtigt, bei denen das Fahrzeug tatsächlich in Bewegung war, sodass die Verteilung nicht einer allgemeinen Geschwindigkeitsverteilung im Stadtverkehr entspricht.

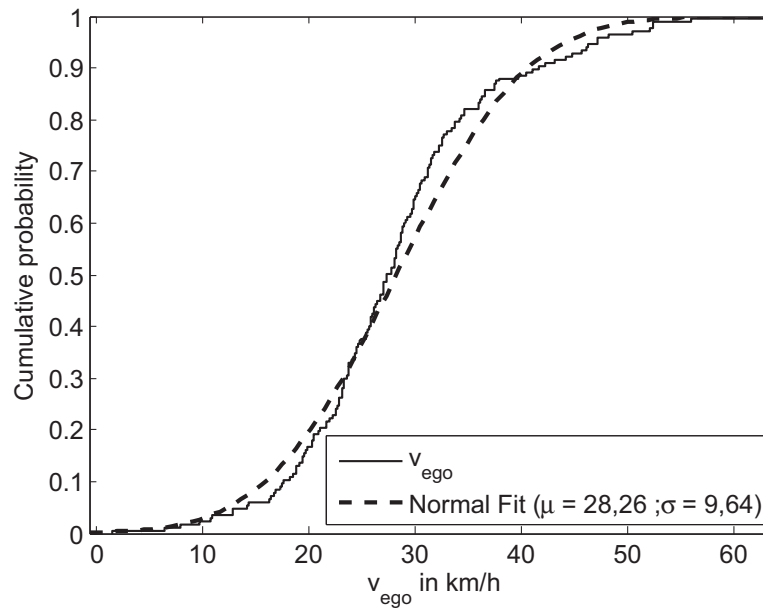


Abbildung 6.8: Verteilung der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$  bei den auftretenden FP

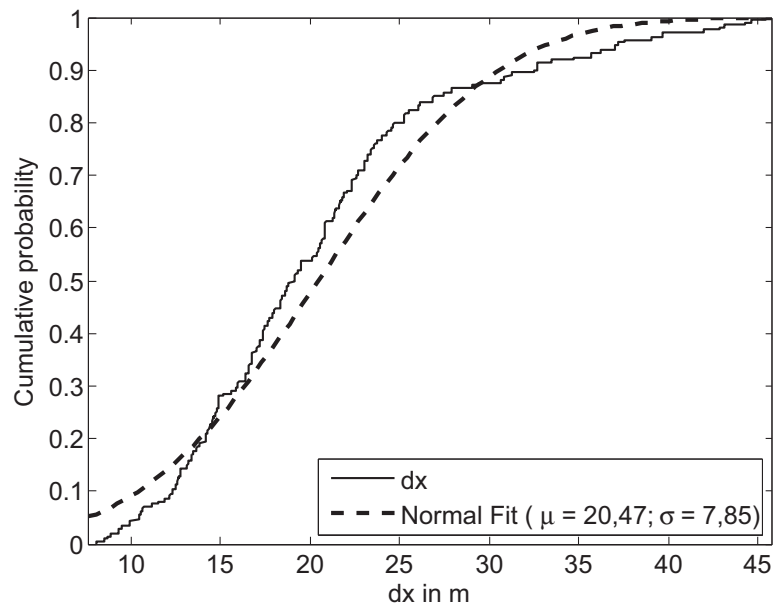


Abbildung 6.9: Verteilung der longitudinalen Entfernung  $dx$  der auftretenden FP

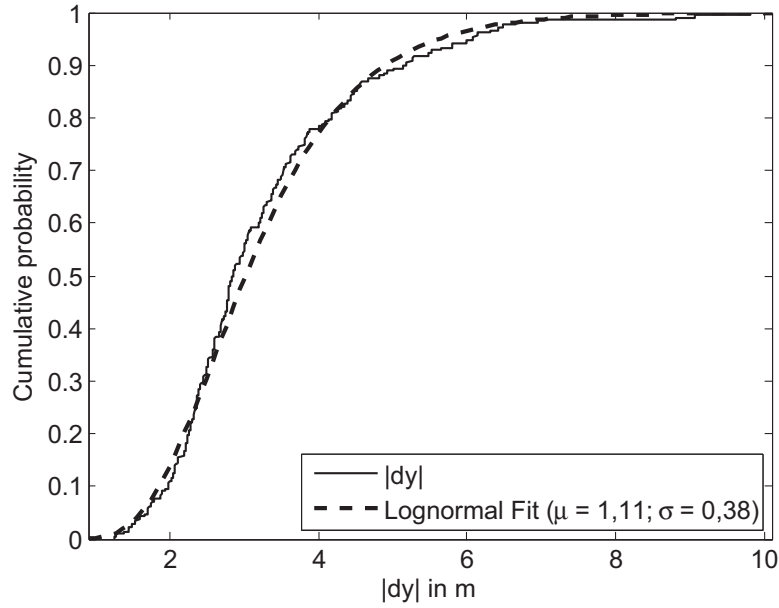


Abbildung 6.10: Verteilung der lateralen Entfernung  $|dy|$  der auftretenden FP

Das Auftreten in lateraler Richtung  $dy$  wurde bereits im vorigen Abschnitt angesprochen. Für die Modellierung wurde nur der Betrag von  $dy$  betrachtet, da es für die Situationsanalyse unerheblich ist, ob ein FP auf der linken oder der rechten Seite auftritt. Es wurden dabei die Ausreißer ( $|dy| > 10$  m) vernachlässigt, da diese in der Situationsanalyse keine Auswirkung haben. Des Weiteren wurde die Einschränkung  $|dy| > 1$  m getroffen, da sich das Fahrzeug in der simulierten Szene konstant bewegt. Ein FP im Fahrkorridor würde so zwangsläufig zu einer Fehlwarnung führen und das Ergebnis verfälschen. Mit diesen Einschränkungen ergibt sich die in Abbildung 6.10 dargestellte Verteilung. Die Modellierung mittels einer Normalverteilung ist an dieser Stelle nicht sinnvoll, durch eine Maximum-Likelihood-Schätzung ergibt sich stattdessen eine bessere Annäherung durch eine Lognormalverteilung (logarithmische Normalverteilung). Der Mittelwert beträgt hierbei 3,25 m mit einer Standardabweichung von 1,61 m (Die Parameter  $\mu$  und  $\sigma$  in Abbildung 6.10 sind die Parameter der Lognormalverteilung und entsprechen nicht dem Mittel- bzw. Erwartungswert oder der Standardabweichung). Als letztes charakteristisches Merkmal bleibt die Dauer bzw. Anzahl der Einzelbilder  $N_F$ , in denen ein FP sichtbar war. Der entsprechende Verlauf findet sich in Abbildung 6.11. Er wird ebenfalls durch eine lognormale Verteilung angenähert. Der Mittelwert liegt hier bei 23 Frames pro FP mit einer Standardabweichung von etwa 19.

In der Simulation wird ein FP entsprechend der obigen Verteilungen auftreten und die Attribute gemäß (6.3) und (6.4) künstlich verrauscht. In jedem simulierten Durchgang tritt dabei genau ein FP auf, sodass sich durch eine Hochrechnung mittels der mittleren Anzahl von 20 FP pro Stunde abschätzen lässt, wie viele falsche Systemreaktionen pro



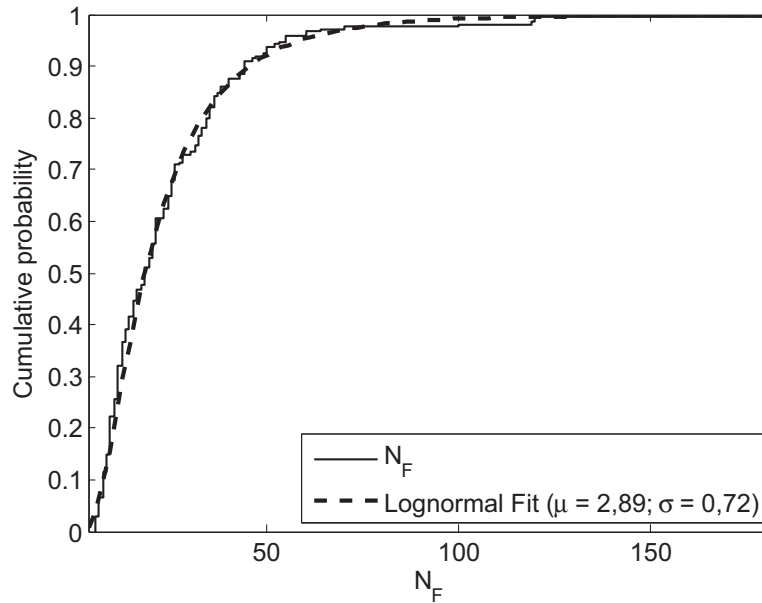


Abbildung 6.11: Verteilung der Verweildauer  $N_F$  (in Anzahl Frames) der auftretenden FP

Stunde bei welcher Kombination von Attributgütern zu erwarten sind. Die Ergebnisse der Untersuchung sind im nächsten Abschnitt zusammengefasst.

## 6.4 Einfluss auf das Gesamtsystem

### 6.4.1 Fußgänger-Szenen

Mit den im vorigen Abschnitt modellierten Attribut-Fehlern wird in diesem Abschnitt die Sensitivität des Systems in ungefährlichen Szenen mit Fußgängern untersucht. Wie in Abschnitt 6.3 bereits beschrieben, wurde hierfür nur eine bestimmte Auswahl an Szenen getroffen, welche keine Fahrerwarnung rechtfertigen, bei denen eine Fehlwarnung jedoch möglich erscheint.

Zu diesem Zweck wurden tatsächlich auftretende Fußgänger-Szenen aus 90 Minuten Stadtfahrt extrahiert und kategorisiert. Der untersuchte Zeitraum genügt zwar nicht für eine vollständige statistische Aussage, jedoch können erste Rückschlüsse auf die Verteilung der Art der Szenen gezogen werden. Die wichtigste Kategorie ist die Vorbeifahrt an einem stehenden oder längs bewegten Fußgänger ( $n\_lon\_pass$ ). Diese ist im normalen Straßenverkehr sehr häufig (in der Stichprobe insgesamt 15 Mal). Für die Sensitivitätsanalyse wurde daher als erste Szene eine solche Vorbeifahrt an einem Fußgänger im lateralen Abstand von 1,5 m zum Fahrkorridor gewählt (Mittelwert der Szenen der Stichprobe). Die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt in der Szene 35 km/h ( $n\_lon\_pass\_35\_1,5$ ), was der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit der betrachteten Szenen entspricht.

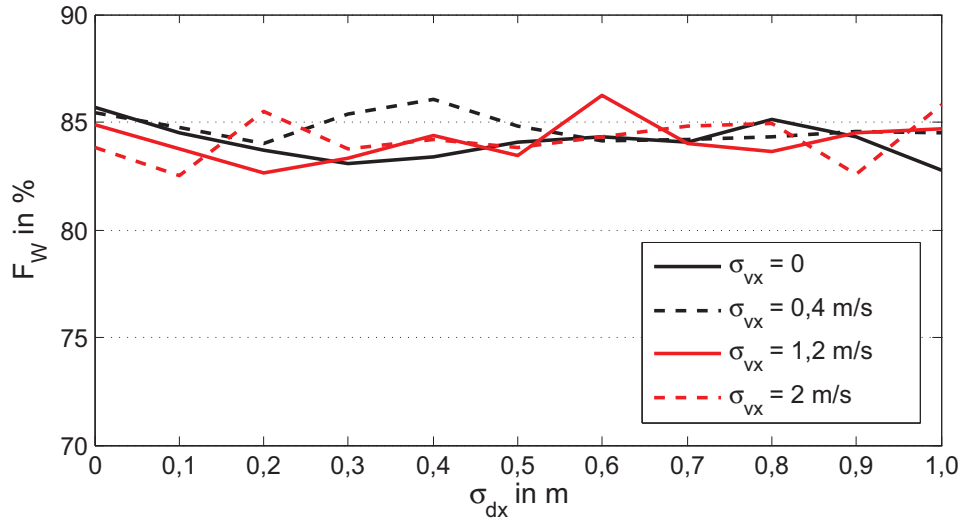


Abbildung 6.12: Rel. Häufigkeit der Warnstufe  $W$  ( $F_W$ ) in simulierter Szene (Vorbeifahrt an stehendem Fußgänger) in Abhängigkeit von  $\sigma_{dx}$  und  $\sigma_{vx}$

Die Standardabweichungen der Attribute aus (6.4) werden dabei wie folgt variiert:

$$\sigma_{dx} \in \{0, 1k \text{ m} | k = 0, \dots, 10\} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{dy} \in \{0, 1k \text{ m} | k = 0, \dots, 10\} \quad (6.6)$$

$$\sigma_{vx} \in \{0, 2k \text{ m/s} | k = 0, \dots, 10\} \quad (6.7)$$

$$\sigma_{vy} \in \{0, 2k \text{ m/s} | k = 0, \dots, 10\} \quad (6.8)$$

Die Standardabweichungen der Geschwindigkeitsattribute wurden dabei höher gewählt, da die Geschwindigkeit beim eingesetzten Stereo-System aus der Position abgeleitet wird und daher größeren Schwankungen unterliegt. Die Szene wurde für jede Parameterkonfiguration insgesamt  $N = 50$  mal simuliert, wobei ein Vergleich der ersten 25 Läufe mit den zweiten 25 keine signifikanten Änderungen der Ergebnisse gezeigt hat. Daher ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse in diesem Fall statistisch belastbar sind.

In Abbildung 6.12 ist die relative Häufigkeit des Auftretens der Warnstufe  $W$  (als  $F_W$  bezeichnet) in Abhängigkeit der Parameter  $\sigma_{dx}$  und  $\sigma_{vx}$  dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Darstellung des Effekts von  $\sigma_{dx}$  auf das Gesamtergebnis in Abhängigkeit von einigen Werten für  $\sigma_{vx}$ . Die angegebenen Ergebnisse für  $F_W$  sind Mittelwerte für die beiden anderen Parameter, sodass nur der Effekt der beiden longitudinalen Parameter sichtbar ist. Es fällt auf, dass, wie in einer solchen Szene erwartet, die longitudinalen Parameter so gut wie keinen Einfluss auf das Ergebnis der Szene haben. Die Werte von  $F_W$  sind in diesem Fall insgesamt sehr hoch, da der Mittelwert über alle Konfigurationen von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$  gebildet wurde und das Ergebnis sehr stark von diesen Werten abhängt. Dies wird in Abbildung 6.13 deutlich, welche  $F_W$  in Abhängigkeit von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$  zeigt.

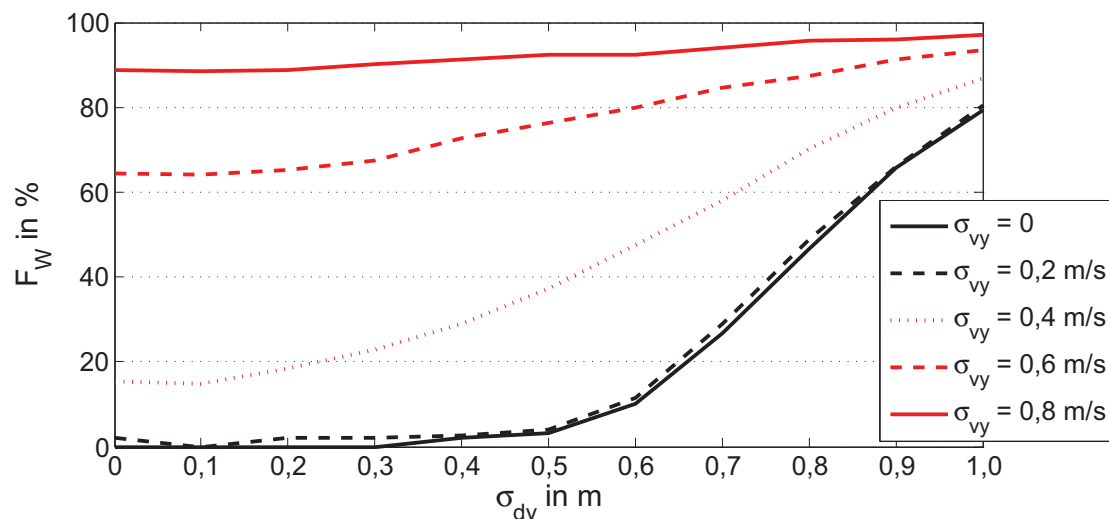


Abbildung 6.13: Rel. Häufigkeit der Warnstufe  $W$  ( $F_W$ ) in simulierter Szene (Vorbeifahrt an stehendem Fußgänger) in Abhängigkeit von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$

Die dargestellten Werte sind erneut Mittelwerte über alle Konfigurationen, der nicht dargestellten Parameter. Die Variation in  $\sigma_{vy}$  wurde hier nur bis  $\sigma_{vy} = 0,8 \text{ m/s}$  abgebildet, da für  $\sigma_{vy} > 0,8 \text{ m/s}$   $F_W$  weiter ansteigt und die Werte bereits für  $\sigma_{vy} = 0,8 \text{ m/s}$  in einem unakzeptablen Bereich liegen. Die starke Abhängigkeit von  $F_W$  von den lateralen Parametern war in dieser Szene zu erwarten, die ersten Fehlwarnungen ( $F_W = 2\%$ ) treten jedoch bereits bei Werten von  $0,2 \text{ m}$  bzw.  $0,2 \text{ m/s}$  auf. Wie bereits erwähnt, ist eine solche Szene im realen Straßenverkehr durchaus häufig, sodass bereits eine Häufigkeit von  $2\%$  zu vielen Fehlwarnungen führen kann (bei 15 Szenen in der Stichprobe würde sich eine Fehlwarnung alle fünf Stunden nur aus dieser Szene ergeben).

Als eine einfache, aber effektive Maßnahme zur Verminderung der Fehlwarnhäufigkeit  $F_W$  hat sich die Ergebnisplausibilisierung erwiesen. Eine aufgetretene Warnung wird zunächst über wenige Zyklen plausibilisiert, sodass ein einmaliges falsches Ergebnis nicht sofort zu einer Fehlwarnung führt. Bei positiven Szenen verursacht dies einen leichten Rückgang des Warnzeitpunkts (bei einer Zykluszeit im Bereich von  $40 \text{ ms}$  und einer Plausibilitätsstufe von zwei Zyklen verringert sich die Warnzeit beispielsweise um  $80 \text{ ms}$ ), im Vergleich zu der Verringerung der Fehlwarnhäufigkeit  $F_W$  hat sich dies jedoch als ein sehr guter Kompromiss erwiesen. Dies wird in Abbildung 6.14 deutlich. Hier ist  $F_W$  erneut in Abhängigkeit von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$  dargestellt, jedoch bei einer Plausibilitätsstufe von zwei Zyklen. Im Bereich von  $\sigma_{dy}, \sigma_{vy} \in [0,6; 0,2]$  treten bei dieser Stufe keine Fehlwarnungen in der Simulation<sup>83</sup> mehr auf, d. h. für diese Szene können die Anforderungen an die Attributgüten im Vergleich zu dem Ergebnis ohne Plausibilisierung leicht gesenkt werden.

<sup>83</sup>Das bedeutet natürlich nicht, dass es in der Realität nicht trotzdem auch in einer solchen Szene noch zu Fehlwarnungen kommen könnte.

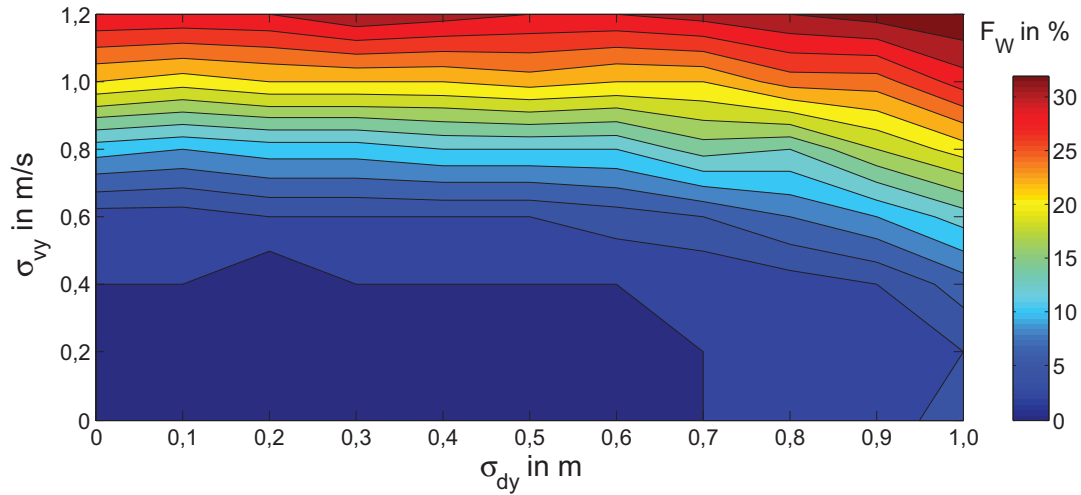


Abbildung 6.14: Rel. Häufigkeit der Warnstufe  $W$  ( $F_W$ ) in simulierter Szene (Vorbeifahrt an stehendem Fußgänger) in Abhängigkeit von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$ , Plausibilitätsstufe 2

Eine weitere häufige Szene im Straßenverkehr ist das ungefährliche Überqueren der Straße durch den Fußgänger rechtzeitig vor dem Fahrzeug ( $n\_lat\_pass$ ). Eine solche Szene wurde im zweiten Schritt mit der gleichen Methodik wie in der ersten Szene simuliert. In der vorhandenen Stichprobe ist diese Szene deutlich seltener als die Vorbeifahrt an einem Fußgänger, trat aber insgesamt vier Mal in den 90 ausgewerteten Minuten auf. Als Parameter für die Simulation wurde eine Fahrzeuggeschwindigkeit von 30 km/h und eine Fußgängergeschwindigkeit von 5 km/h gewählt. Der Fußgänger verlässt beim Überqueren den Fahrkorridor in dieser Szene in einer Entfernung von 17,25 m, was einer Zeitlücke von 2,07 s entspricht ( $n\_lat\_pass\_30\_5\_17,25$ ). Diese Parameter entsprechen nicht dem Durchschnitt<sup>84</sup> aus denen in der Stichprobe gefundenen, sondern der Szene, in der der Abstand des Fußgängers beim Verlassen des Fahrkorridors am geringsten war. In den anderen Szenen war der Abstand teilweise so groß, dass auch bei sehr schlechten Attributen keine Fehlwarnung zu erwarten wäre.

Der Effekt von  $\sigma_{dx}$  und  $\sigma_{vx}$  ist hier wie in der vorigen Szene kaum gegeben und verläuft sehr ähnlich zu dem in Abbildung 6.12 gezeigten. Im Gegensatz zur vorigen Szene wäre hier ein kleiner Effekt denkbar gewesen, da sich der Fußgänger zwischenzeitlich im Fahrkorridor aufhält. Je näher er sich dabei zum Fahrzeug befindet, desto potenziell kritischer ist die Situation. In dem getesteten Bereich für  $\sigma_{dx}$  und  $\sigma_{vx}$  tritt dieser Effekt jedoch nicht auf.

Der Einfluss von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$  ist hingegen auch in dieser Szene sehr deutlich. In Abbildung 6.15 ist die relative Häufigkeit  $F_W$  der Fehlwarnungen für die Plausibilitätsstufe von zwei Zyklen aufgetragen. Für  $\sigma_{dy}, \sigma_{vy} \in [0,7; 0,4]$  treten hier keine Fehlwarnungen

<sup>84</sup>Dieser lag für die Entfernung beim Verlassen des Fahrschlauchs bei knapp 32 m. Die durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit betrug 27 km/h.

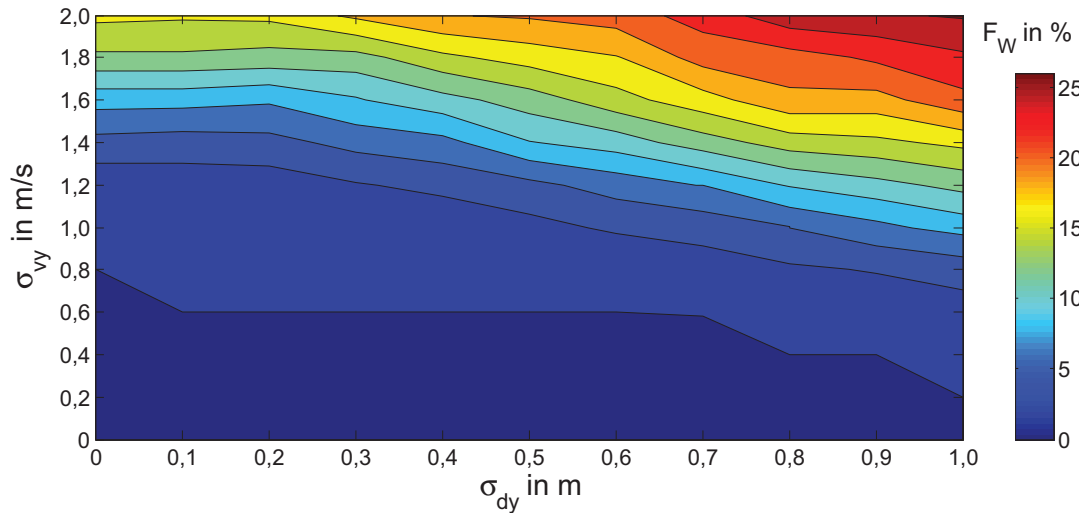


Abbildung 6.15: Rel. Häufigkeit der Warnstufe  $W$  ( $F_W$ ) in simulierter Szene (ungefährliches Überqueren der Straße durch den Fußgänger) in Abhängigkeit von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$ , Plausibilitätsstufe 2

auf, d. h. im Vergleich zur vorigen Szene könnten die Anforderungen etwas gelockert werden bzw. aus dieser Szene ergeben sich nicht die entscheidenden Anforderungen an die Attributgüten.

Die letzte betrachtete Szene in diesem Abschnitt ist die eines quer bewegten Fußgängers, welcher rechtzeitig vor dem Eintreten in den Fahrkorridor anhält ( $n\_lat\_stop$ ). Der Abstand zum Fahrkorridor beträgt dabei im Moment des Stillstands des Fußgängers 1,5 m. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wurde erneut mit 30 km/h angenommen, die initiale Geschwindigkeit des Fußgängers mit 5 km/h. Die Verzögerung des Fußgängers beträgt ab dem Zeitpunkt des Verzögerens (bei einem Abstand von 2,5 m zum Fahrkorridor und einer  $TTC$  von 1,8 s) konstant  $1 \text{ m/s}^2$  für knapp 1,4 s ( $n\_lat\_stop\_30\_5\_1\_1,5$ ).<sup>85</sup> In der ausgewerteten Stichprobe trat nur eine vergleichbare Szene auf, welche allerdings unkritischer war, da der Fußgänger bereits bei einem Abstand zum Fahrkorridor von ca. 2 m den Stillstand erreichte und sich auch mit weniger als 5 km/h auf das Fahrzeug zu bewegte.

Auch in dieser Szene ist nur eine sehr geringe Abhängigkeit der Fehlwarnhäufigkeit  $F_W$  von den longitudinalen Parametern  $\sigma_{dx}$  und  $\sigma_{vx}$  festzustellen. Des Weiteren verhält sich auch die Abhängigkeit von den lateralen Parametern ähnlich zu den beiden bereits betrachteten Szenen. Dies wird in Abbildung 6.16 noch einmal deutlich.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die longitudinalen Attributgüten  $\sigma_{dx}$  und  $\sigma_{vx}$  nur sehr wenig Einfluss auf potenzielle Fehlwarnungen in diesen Szenen haben. Die Anforderungen an die lateralen Parameter  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$  werden durch den häufigsten Szenentyp des am Rand stehenden Fußgängers bestimmt. Obwohl hier die Anforderung

<sup>85</sup>Dies entspricht einer Verzögerung zwischen komfortablem und maximalem Niveau nach Kapitel 4.

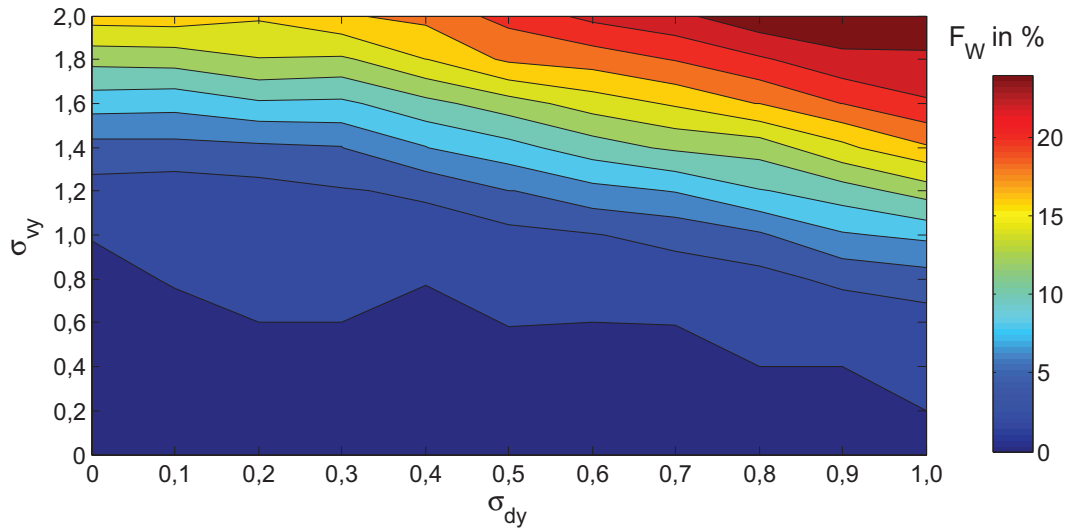


Abbildung 6.16: Rel. Häufigkeit der Warnstufe  $W$  ( $F_W$ ) in simulierter Szene (Fußgänger hält rechtzeitig vor Betreten des Fahrkorridors an) in Abhängigkeit von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$ , Plausibilitätsstufe 2

an  $\sigma_{dy}$  deutlich schwächer ist als an  $\sigma_{vy}$ , wird eine Optimierung der Güte von  $vy$  nicht ohne eine gleichzeitige Verbesserung der Güte von  $dy$  möglich sein, da die beiden Parameter im eingesetzten System voneinander abhängen. Allerdings ist es möglich, speziell für den stehenden Fußgänger, bei dem die laterale Geschwindigkeit besonders genau verfügbar sein muss, den Wert  $vy$  etwas stärker zu filtern (für kleine  $vy$ ) und so die Anforderungen leicht abzuschwächen.

### 6.4.2 FP Szenen

Die angesprochenen FP Szenen sind für die Gesamtzahl möglicher Fehlwarnungen entscheidend, da diese deutlich häufiger vorkommen als kritische Szenen mit echten Fußgängern.<sup>86</sup> Daher wurden diese Szenen mit den entsprechenden Verteilungen<sup>87</sup> aus Abschnitt 6.3 (siehe Abbildungen 6.8 bis 6.11) simuliert. Da in diesen Szenen deutlich mehr freie stochastische Parameter eine Rolle spielen, wurde die Gesamtzahl der durchgeführten Simulationen auf  $N = 1000$  erhöht. Ein Vergleich der Ergebnisse aus jeweils der Hälfte der Simulationen zeigte dabei keine auffälligen Unterschiede.

Die Ergebnisse des vorigen Abschnitts bestätigen sich in diesen Szenen, der Einfluss von  $\sigma_{dx}$  und  $\sigma_{vx}$  spielt auch hier nur eine untergeordnete Rolle. Der Einfluss der lateralen Parameter auf die Fehlwarnhäufigkeit wird in Abbildung 6.17 beschrieben. Hier wurde wie im Abschnitt zuvor eine Plausibilitätsstufe von zwei Zyklen gewählt. Die Skalierung

<sup>86</sup>Dementsprechend ist die Gewichtung dieser Szenen höher und der Einfluss auf die  $FWR$  damit größer.

<sup>87</sup>Die Verteilungen basieren auf dem bereits beschriebenen Testdatensatz für FP mit einer Dauer von 13 Stunden.

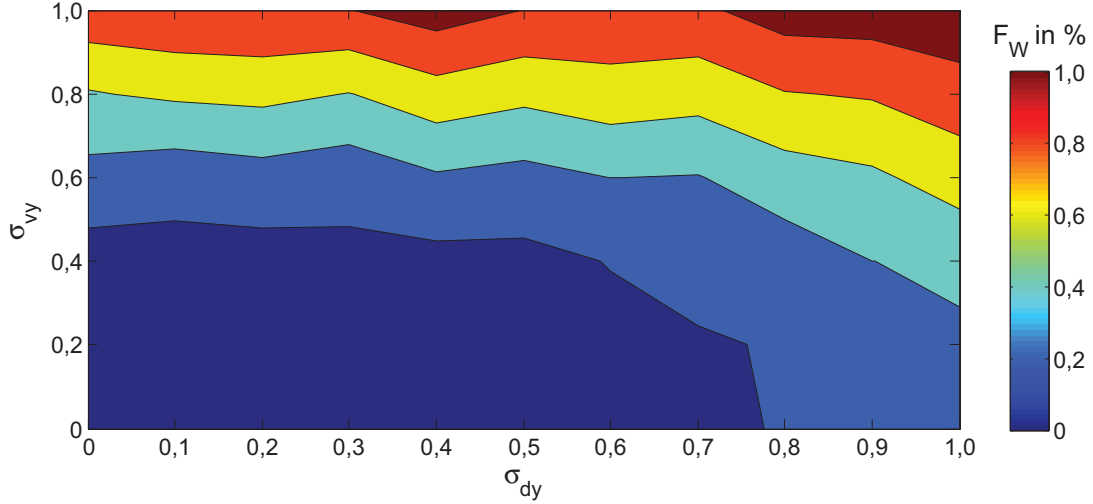


Abbildung 6.17: Rel. Häufigkeit der Warnstufe  $W$  ( $F_W$ ) in simulierter Szene (FP Szene) in Abhängigkeit von  $\sigma_{dy}$  und  $\sigma_{vy}$ , Plausibilitätsstufe 2

von  $F_W$  muss in diesem Fall deutlich feiner sein, da eine solche Szene etwa 20-mal pro Stunde Stadtfahrt vorkommt. Daher sollte  $F_W$  im Bereich von unter 0,5 %<sup>88</sup> liegen, um die Anforderungen an die Anzahl der Fehlwarnungen pro Stunde überhaupt erfüllen zu können. Die Werte wurden hier nur für  $\sigma_{vy}$  bis 1,0 m/s dargestellt, da  $F_W$  bereits hier jenseits des akzeptablen Bereichs liegt.

Es zeigt sich, dass der Bereich der Attributgüten, in dem es zu keinen (bzw. unter 0,2 %) Fehlwarnungen kommt, annähernd mit den Anforderungen aus dem vorigen Abschnitt übereinstimmt. Das bedeutet, um keine (bzw. akzeptabel wenig) Fehlwarnungen durch FP zu erhalten, muss für die Standardabweichungen der lateralen Parameter gelten:

$$\sigma_{dy}, \sigma_{vy} \in [0,5; 0,4]. \quad (6.9)$$

Diese Anforderung ist insofern wichtiger als die vorigen, da eine Fehlwarnung auf einen echten Fußgänger vom Fahrer eventuell subjektiv noch als gerechtfertigt eingeschätzt wird, eine Fehlwarnung ohne Fußgänger jedoch sicherlich nicht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Leistung bezüglich Fehlwarnungen des Gesamtsystems die lateralen Attributgüten entscheidend sind und die Sensorik auf diese hin optimiert werden muss. Da diese nicht unabhängig von der Entfernungsmessung sind, wird entsprechend eine gewisse Güte der Messung benötigt. Jedoch nur insofern, dass die Anforderungen an die laterale Position erfüllt werden können. Des Weiteren ist es durch die Analyse möglich, kontextsensitive Filter zum Beispiel bei der lateralen Geschwindigkeit zu benutzen. Durch solche Maßnahmen, wie auch dem Einführen der

<sup>88</sup>Dies entspricht einer Fehlwarnung in 10 Stunden Stadtfahrt und stellt die Mindestanforderung (wie sie in Kapitel 2 aufgestellt wurde) an die Fehlwarnrate dar.

Plausibilitätsstufen, wird zwar in Nutzenszenen die Warnzeit geringfügig vermindert, andernfalls würde das System jedoch nicht akzeptiert und so keinerlei Nutzen erbringen.

Die Ergebnisse dieses Kapitels flossen in die Weiterentwicklung sowohl der Sensorik als auch der Situationsanalyse mit ein. Das Gesamtergebnis für die Absicherung der Warnfunktion wird im nächsten Kapitel vorgestellt.



## 7 Das Gesamtsystem

In diesem Kapitel wird abschließend das Gesamtsystemkonzept bzw. das im Versuchsträger umgesetzte Reaktionsschema beschrieben. Anschließend wird die erzielte Leistung des Systems bezüglich Fehlauflösungen beschrieben, welche durch die im vorigen Kapitel erwähnten Optimierungsmaßnahmen verbessert werden konnte. Die Leistung des Systems in Nutzenszenen stimmt im Wesentlichen mit den in Kapitel 5 beschriebenen überein<sup>89</sup>, sodass auf eine erneute Ausführung verzichtet wird.

### 7.1 Reaktionsschema und Human-Machine-Interface

Damit eine Fußgängerkollisions-Warnfunktion für den Fahrer sinnvoll ist, muss der Fahrer die ausgegebene Warnung wahrnehmen und auch richtig interpretieren können (siehe auch Kapitel 2). Hierfür bedarf es einer Warnstrategie, die den Fahrer möglichst schnell und intuitiv auf die bevorstehende Gefahr aufmerksam macht. Aus diesem Grund wird für das Warnsystem ein dreistufiges Warnkonzept eingesetzt. Es beinhaltet sowohl ein optisches, akustisches und haptisches Warnelement. Insbesondere die haptische Warnung durch einen Bremsruck wird von Fahrern sehr schnell verarbeitet und kann zu kurzen Reaktionszeiten führen (siehe auch Abschnitt 2.3.3).

Ein großes Problem in diesem Kontext besteht in der Interpretierbarkeit der Warnung: Diese tritt im Fahreralltag selten auf, da gefährliche Situationen mit Fußgängern i.A. die Ausnahme darstellen. Dies kann dazu führen, dass der Fahrer eine Warnung in einer kritischen Situation nicht als solche erkennt, da sie ihm unbekannt ist. Eventuell hat er keine Kenntnis, dass sein Fahrzeug mit einem solchen System ausgestattet ist (zum Beispiel Fahrer von Mietwagen). Diesem Effekt entgegenwirken soll eine Art Vorwarnung oder Aufmerksamkeitssteuerung vor der eigentlichen Warnung des Fahrers (ausgelöst bei Eskalationsstufe *PW*, siehe Kapitel 5). Die rein optische Vorwarnung wird früher ausgegeben (je nach Situation bis zu einer *TTC* bzw. *TTP* von 2, 3 s) und auch bei Situationen, in denen sich der Fußgänger nicht unbedingt auf Kollisionskurs mit dem Fahrzeug befindet,

---

<sup>89</sup>Es wurden aufgrund der Einführung der Plausibilitätsstufen leichte Anpassungen an den Sicherheitsbereichen durchgeführt, die jedoch zu keiner generellen Veränderung der Leistung in Nutzenszenen geführt haben.

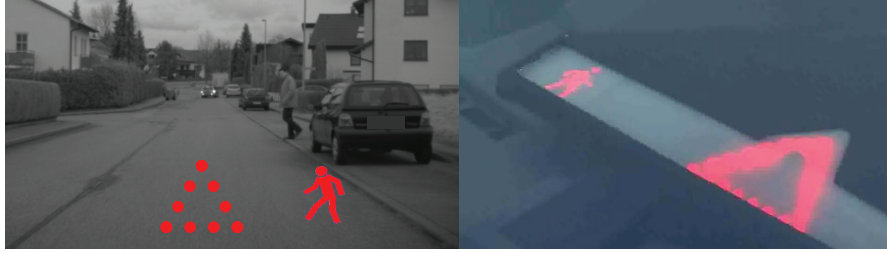


Abbildung 7.1: Optische Warnelemente im Head-Up-Display, links aus Sicht des Fahrers, rechts prototypische Darstellung im Versuchsträger

die Situation aber trotzdem als kritisch empfunden wird. Steht ein Fußgänger beispielsweise am Fahrbahnrand und das Fahrzeug fährt mit hoher Geschwindigkeit knapp an ihm vorbei (siehe Abschnitt „Sicherheitsbereiche“ in Kapitel 3), wird eine richtungsgebundene optische Vorwarnung ausgegeben. Diese Art der Vorwarnung wird im Vergleich mit der eigentlichen Warnung (Eskalationsstufe  $W$ ) öfter ausgegeben und kann so vom Fahrer „erlernt“ werden. Kommt es in einer gefährlichen Situation zu einer Warnung, so erkennt der Fahrer den optischen Anteil der Warnung wieder und kann das akustische und haptische Element direkt der Gefahrensituation mit dem Fußgänger zuordnen.

Das optische Element der Vorwarnung besteht dabei aus einem Fußgänger-Symbol, welches mittels eines Head-Up-Displays (HUD) in den Sichtbereich des Fahrers auf die Windschutzscheibe projiziert wird (siehe auch Abbildung 7.1). Im Fall der eigentlichen Warnung (je nach Situation im Bereich einer  $TTC$  von um  $1,8\text{ s}$ ) wird zusätzlich ein Warn-dreieck mittig im HUD angezeigt, begleitet von einem akustischen Warnton. Zu diesem Zeitpunkt wird zusätzlich der Bremsassistent des Versuchsfahrzeugs umparametriert, so dass der Fahrer diesen deutlich leichter auslösen kann.

In einem letzten Schritt wird der bereits angesprochene Bremsruck ausgelöst (mit zeitlichem Versatz zur Warnung). Reagiert der Fahrer auch hierauf nicht, ist die Ansteuerung der automatischen Notbremsung bei der Eskalationsstufe  $EB1$  möglich.

## 7.2 Absicherung

Da die Leistung des Systems bezüglich fehlerhafter Warnungen bzw. Auslösungen, wie sie in Kapitel 5 beschrieben wurde, für einen serientauglichen Einsatz weiter verbessert werden musste, wurden Optimierungsmaßnahmen aus den Ergebnissen in Kapitel 6 abgeleitet und umgesetzt.

Während der Laufzeit der Arbeit wurde die Datenbasis von 7,6 Stunden Stadtfahrt, welche in Kapitel 5 benutzt wurde, auf insgesamt 50 Stunden Stadtfahrt in den Großräumen Stuttgart und Hannover ausgeweitet. Auf Grundlage dieser Daten wurde die Absicherung

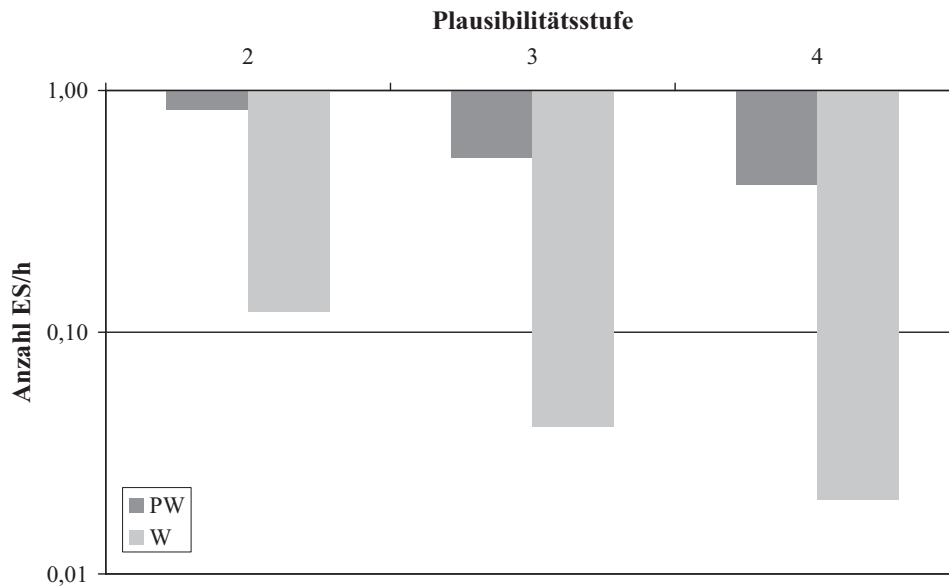


Abbildung 7.2: Auftreten der Eskalationsstufen *PW* und *W* pro Stunde in Abhängigkeit der Plausibilitätsstufe

für die Fahrerwarnfunktion durchgeführt. Es hat sich dabei gezeigt, dass die Optimierung der Sensorik und der Situationsanalyse auf die im vorigen Kapitel analysierten Szenen richtig war, die Optimierung der Geschwindigkeit insbesondere für FP-Objekte (False Positive) jedoch nicht in allen Fällen möglich war. Wie bereits angesprochen, kann es vorkommen, dass FP-Objekte auf Teilen von realen Objekten gebildet werden und durch die Verschiebung der Perspektive diese Objekte auf den realen Objekten „mitwandern“ und so unweigerlich eine Geschwindigkeit gemessen wird. Für solche Objekte hat sich am Ende die Erhöhung der Plausibilitätsstufe als wirksamstes Mittel erwiesen.

Abbildung 7.2 zeigt das Auftreten der Warnstufen *PW* und *W* pro Stunde in den 50 untersuchten Stunden in Abhängigkeit der gewählten Plausibilitätsstufe. Es zeigt sich, dass eine Erhöhung der Plausibilitätsstufe um einen Zyklus im Mittel ungefähr zu einer Halbierung der aufgetretenen Fehlwarnungen führt. Die Anforderung für die Fehlwarnrate (*FWR*), welche in (2.3) definiert wurde ( $FWR < 10^{-1} \text{ h}^{-1}$ ), kann hier ab einer Plausibilitätsstufe von drei Zyklen erfüllt werden. Die Vorwarnung (*PW*) tritt in diesem Fall allerdings häufiger auf, sodass die Akzeptanz eventuell nicht gewährleistet ist.

Die Erhöhung der Plausibilitätsstufe führt, wie bereits beschrieben, zu einem Verlust der Warnzeit in Nutzenszenen um das entsprechende Vielfache der Zykluszeit. Um dadurch den Nutzen nicht zu stark zu mindern, wurden die beschriebenen Sicherheitsbereiche zur Kompensation des Effekts um das Fahrzeug leicht ausgedehnt<sup>90</sup>. Dies hatte auf die Anzahl der Fehlwarnungen keinen Einfluss. Jedoch konnte dadurch der Verlust in der Warnzeit größtenteils ausgeglichen werden.

<sup>90</sup>Der in Abschnitt 4.7 beschriebene zeitliche Sicherheitsfaktor wurde um 0,1 s erhöht.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein neuer Situationsanalyse-Ansatz zur Kollisionsprädiktion im vorausschauenden Fußgängerschutz entwickelt und umgesetzt. Dafür wurden in Kapitel 2 allgemeine Anforderungen an ein vorausschauendes Fußgängerschutzsystem sowie spezielle Anforderungen an die eingesetzte Sensorik mittels einer Unfalldatenanalyse auf Basis von GIDAS<sup>91</sup>-Daten hergeleitet.

Darauf aufbauend wurden in Kapitel 3 existierende Situationsanalyse-Ansätze untersucht. Keiner dieser Ansätze versprach, die aufgestellten Anforderungen in gewünschter Weise zu erfüllen. Aus diesem Grund wurde ein neuer Ansatz entwickelt, welcher auf einem differenzierten Fußgängerbewegungsmodell aufbaut. Die Grundidee des Ansatzes besagt, dass die Kollisionswahrscheinlichkeit steigt, je näher der Fußgänger an die Grenzen seiner Bewegungsmöglichkeiten gehen muss, um die Kollision noch zu vermeiden.<sup>92</sup> Hierzu wurden die Möglichkeiten des Fußgängers als Trajektorien modelliert. Es zeigte sich, dass die für den Fußgänger günstigsten Vermeidungsmöglichkeiten meist als reine eindimensionale Bewegungen (entspricht Beschleunigung und Verzögerung) angenommen werden können.

Die Bewertungsmethodik für die Durchführung einer solchen Trajektorie wurde in Kapitel 4 entwickelt. Hierzu wurde eine Probandenstudie entworfen und durchgeführt. So konnte ein Modell für die Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern abgeleitet werden, welches die bisherige Geschwindigkeit, die Bewegungsrichtung des Fußgängers sowie die ihm zur Verfügung stehende Zeit berücksichtigt. Es wurde gezeigt, dass die Annahme bisheriger Ansätze an die Bewegungsmöglichkeiten von Fußgängern (eine isotrope Beschleunigung mit  $9,81 \text{ m/s}^2$ ) im Allgemeinen zu hoch ist. Insbesondere im unfallstatistisch häufigsten Fall eines bewegten Fußgängers fiel die tatsächlich mögliche Beschleunigung in der Probandenstudie teils deutlich geringer aus.

Für die Trajektorienbewertung wurden anschließend Funktionen für die mittlere Beschleunigung in verschiedenen Bewegungszuständen ermittelt und das Bewegungsmodell in die Situationsanalyse integriert. Auf Basis erster theoretischer Ergebnisse wurde gezeigt, dass die Unvermeidbarkeit einer Kollision deutlich früher festgestellt werden kann als mit der

---

<sup>91</sup>German In-Depth Accident Study

<sup>92</sup>Im Umkehrschluss steigt damit die Notwendigkeit, dass der Fahrer oder ein im Fahrzeug verbautes System, die Kollision vermeiden muss.

isotropen Annahme. Abschließend wurde eine mögliche Erweiterung des Modells auf zweidimensionale Trajektorien vorgestellt.

Für eine objektive Bewertung wurden in Kapitel 5 ausgewählte existierende Ansätze implementiert und mit dem neuen Ansatz (auch *PMM*-Ansatz für Pedestrian Motion Model) verglichen. Dafür wurden zunächst verschiedene positive und negative Szenarien simuliert.<sup>93</sup> Während in den positiven Szenarien auch andere Ansätze zufriedenstellende Ergebnisse liefern, offenbaren diese jedoch Schwächen in den negativen Szenarien. Um die Leistung der Ansätze auch praktisch zu bewerten, wurden Szenarien mit realen Sensordaten eines Stereo-Videosystems untersucht. Auch hier liefert der *PMM*-Ansatz insgesamt die besten Ergebnisse.

Für eine praktische Umsetzung des *PMM*-Ansatzes im Fahrzeug waren Modifikationen insbesondere im Hinblick auf das Zusammenspiel mit der Sensorik notwendig. Die Ergebnisse in den realen negativen Szenarien waren aufgrund von sogenannten False-Positive-Objekten<sup>94</sup> in der Form noch nicht zufriedenstellend. Daher wurden in Kapitel 6 die Fehler des eingesetzten Stereo-Videosystems sowohl theoretisch als auch praktisch untersucht. Dadurch konnten das Fehlverhalten der Sensorik und die Auswirkungen auf die Situationsanalyse in wichtigen Szenen modelliert werden. Mithilfe des Modells wurden genaue Optimierungsvorgaben an die Sensorik entwickelt und das Ergebnis der Situationsanalyse konnte verbessert werden.

Durch die verbesserte Prädiktion mit dem entwickelten *PMM*-Ansatz ist es gelungen, eine Funktion zur rechtzeitigen Warnung des Fahrers vor einer gefährlichen Situation mit Fußgängern darzustellen. Durch die frühere Feststellung der Unvermeidbarkeit einer Kollision ist es möglich, bei einer umgesetzten Notbremsfunktion die Kollisionsgeschwindigkeit signifikant zu senken und so die potenziellen Unfallfolgen zu mindern. Die Funktion wurde erfolgreich in einem Versuchsfahrzeug dargestellt und u. a. bei der Abschlusspräsentation des öffentlich geförderten Projekts AKTIV demonstriert.

Weiteres Entwicklungspotenzial ergibt sich in erster Linie durch eine Verbesserung der Sensorik und der dadurch zusätzlich verfügbaren Informationen. So könnte das Bewegungsmodell adaptiv gestaltet werden, falls weitere Informationen über den Fußgänger zur Verfügung stünden. Ist beispielsweise bekannt, ob es sich bei einem Fußgänger um einen sportlichen oder unsportlichen Menschen handelt, könnte das Bewegungsmodell entsprechend umparametriert werden und beim unsportlichen Fußgänger, welcher eher geringere Bewegungsmöglichkeiten hat, eine frühere Systemreaktion erfolgen.

---

<sup>93</sup>Mit positiven Szenarien sind hier Szenarien gemeint, in denen eine Reaktion des jeweiligen Ansatzes erwünscht ist, d. h. die Situation zwischen Fahrzeug und Fußgänger ist kritisch. Entsprechend ist in den negativen Szenarien keine Reaktion des Systems erwünscht.

<sup>94</sup>Fälschlicherweise als Fußgänger erkannte Objekte.

Eine weitere wertvolle Information wäre zudem die Erkennung der genauen Blickrichtung des Fußgängers und damit eine mögliche Absichtserkennung. Erste Ansätze hierzu wurden bereits in Kapitel 2 erwähnt (siehe zum Beispiel Gandhi und Trivedi 2008). Mit der Blickrichtung könnte zum einen bei einem stehenden Fußgänger eingeschätzt werden, in welche Richtung er sich wahrscheinlich bewegen wird. Zum anderen könnte eine Systemreaktion verzögert oder gar nicht eingeleitet werden, falls festgestellt werden kann, dass der Fußgänger das sich nähernde Fahrzeug erkannt hat. In diesem Fall steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Fußgänger die Kollision selbst vermeidet.

In diesem Zusammenhang ist eine Aufmerksamkeitserkennung des Fahrers zu nennen, welche in Grundzügen bereits existiert (umgesetzt zum Beispiel im Lexus LS460). Ähnlich der Blickrichtung des Fußgängers bietet eine bekannte Blickrichtung des Fahrers die Möglichkeit einen Eingriffszeitpunkt entsprechend zeitlich nach vorne oder hinten zu verlagern. Im Falle eines unaufmerksamen Fahrers könnte eine Warnung beispielsweise deutlich früher erfolgen, ohne dass der Fahrer von dieser irritiert würde. Umgekehrt kann eine Warnung komplett unterdrückt werden, falls sich aus der Blickrichtung des Fahrers ergibt, dass er den Fußgänger bereits gesehen hat.

Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit stellt die in Abschnitt 4.8 angesprochene Erweiterung des Bewegungsmodells auf zwei Dimensionen dar. Diese bietet zwar im Vergleich mit den obigen Informationen über den Fußgänger bzw. den Fahrer weit weniger Nutzen, könnte dafür jedoch durch weitere Probandentests und ohne zusätzliche Anforderungen an die Umfelderkennung realisiert werden.

Als letzte Weiterentwicklungsmöglichkeit ist die Erweiterung des Wirkungsfelds des Systems zu nennen. Aufgrund des begrenzten Sichtfelds der eingesetzten Sensorik werden beispielsweise Unfälle in Abbiege-Situationen bisher nicht adressiert. Diese führen zwar aufgrund der eher niedrigen Geschwindigkeiten meist nicht zu schweren Verletzungen bei Fußgängern, stellen jedoch mit einem Anteil von ca. 15 % (siehe Kapitel 2) den zweithäufigsten Unfalltyp dar.





# A Ergebnisse der Situationsanalyse

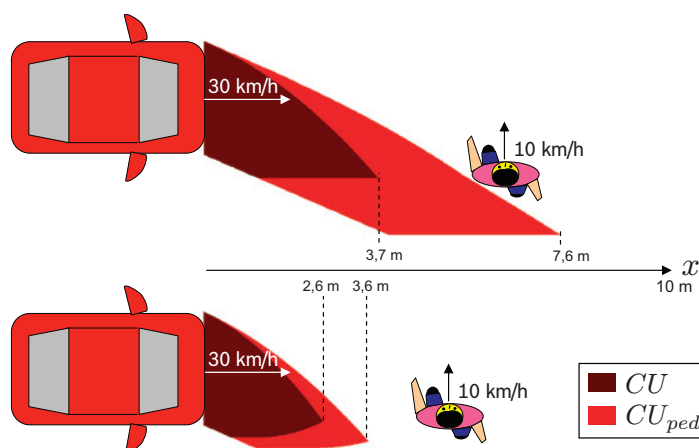


Abbildung A.1: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h, Fußgänger läuft mit 10 km/h

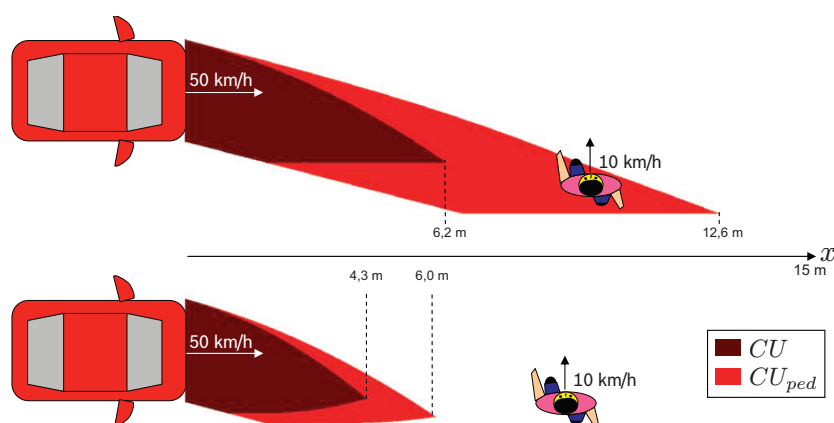


Abbildung A.2: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h, Fußgänger läuft mit 10 km/h

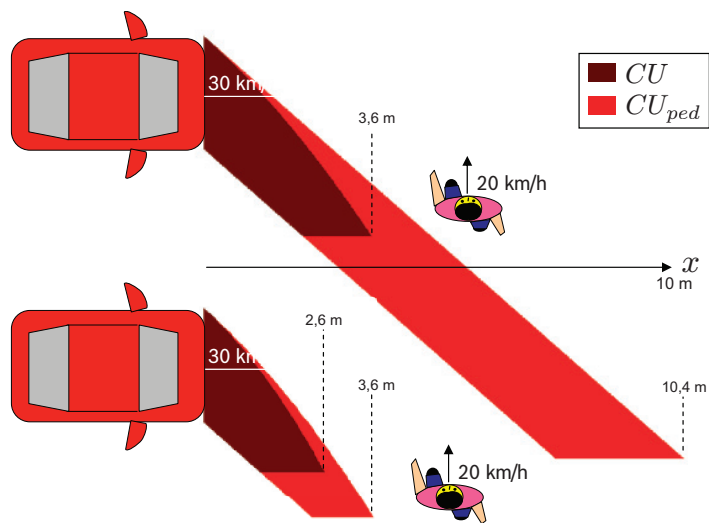


Abbildung A.3: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 30 km/h, Fußgänger rennt mit 20 km/h

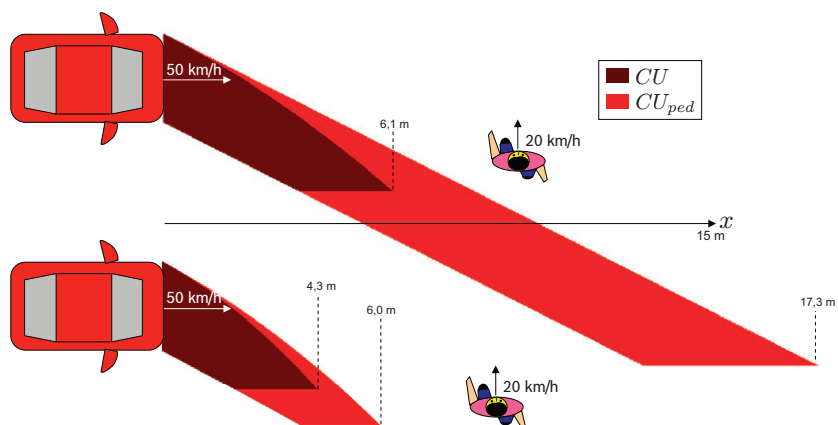


Abbildung A.4: Ergebnisse der Situationsanalyse mit Bewegungsmodell (oben) und ohne (unten): Fahrzeuggeschwindigkeit 50 km/h, Fußgänger rennt mit 20 km/h

# B Entwicklungsumgebung und Simulation

In der eingesetzten Entwicklungsumgebung (EWU) können die verschiedenen SIT-Ansätze sowohl „online“ im Versuchsfahrzeug getestet werden, als auch „offline“ mit realen sowie künstlichen Daten. Die verschiedenen Möglichkeiten werden anhand des Aufbaus der Entwicklungsumgebung (Abbildung B.1) erläutert. Ein großer Vorteil der eingesetzten

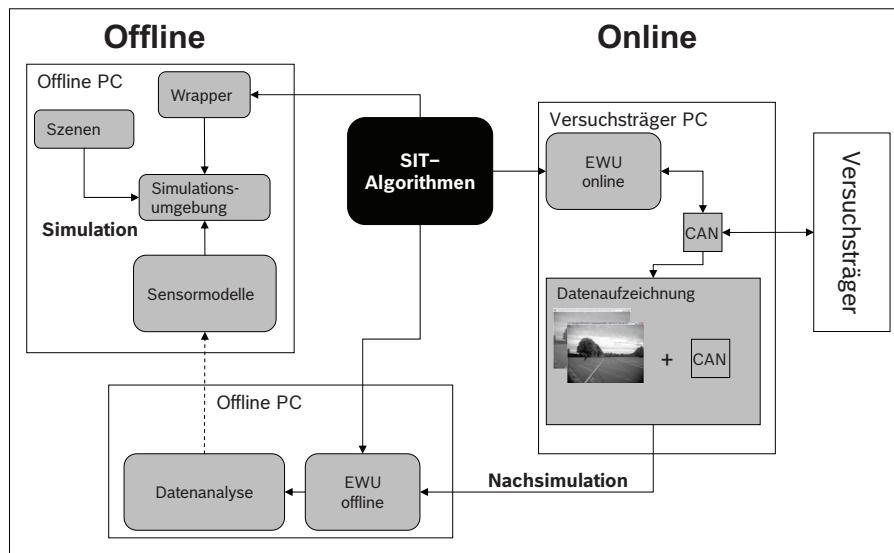


Abbildung B.1: Schematischer Aufbau der eingesetzten Entwicklungsumgebung

Umgebung ist die Wiederverwendbarkeit der Algorithmen zur Situationsanalyse. Diese können in der gleichen Form in allen Möglichkeiten automatisiert genutzt werden, ohne dass ein manueller Anpassungsbedarf besteht.

## B.1 Online-Betrieb

Die Entwicklungsumgebung läuft auf einem PC im Versuchsträger, welcher über mehrere CAN<sup>95</sup>-Bus Anschlüsse verfügt. Über einen Anschluss werden die Fahrzeugdaten in

<sup>95</sup>Controller Area Network

der Entwicklungsumgebung eingelesen sowie die Ausgaben des Systems (Ansteuerung der Warnung oder Bremsung) an die entsprechende Aktorik (HMI-Einheit zur Warnung, ESP-Steuergerät zur Bremsung) geschickt. Die Stereo-Bildverarbeitung läuft auf einem weiteren Versuchsträger-PC, welcher die Rohbilder der Kamera separat einliest. Die Daten des Stereo-Systems (Informationen über erkannte Fußgänger) werden über einen weiteren CAN-Anschluss ebenfalls der Entwicklungsumgebung zur Verfügung gestellt.

## B.2 Nachsimulation

Mit der Nachsimulation wird die Simulation des Systems mit echten Sensordaten bezeichnet. Zu diesem Zweck werden im Versuchsfahrzeug die Rohbilder der Stereo-Kamera sowie relevante Fahrzeugdaten (via CAN-Bus) aufgezeichnet. Die Rohbilder werden anschließend offline von der Stereo-Bildverarbeitung eingelesen und es werden die entsprechenden Ausgaben (erkannte Fußgänger) generiert. Zusammen mit den aufgezeichneten CAN-Daten werden die Ausgaben des Stereo-Systems dann in der Entwicklungsumgebung gelesen und die entsprechenden Systemausgaben erzeugt und aufgezeichnet. Die Algorithmen in der Entwicklungsumgebung sind dabei dieselben, die auch im Online-Betrieb zum Einsatz kommen. Der einzige Unterschied besteht lediglich in der Systemausgabe, welche nicht über den CAN-Bus an das Fahrzeug gesendet, sondern separat in einer Log-Datei gespeichert wird.

Die Nachsimulation ist nur bis zum ersten Eingriff eines Systems korrekt<sup>96</sup>, da sich beispielsweise durch einen angesteuerten Bremsruck die Fahrzeuggeschwindigkeit verändert. Dementsprechend ist ein solches Vorgehen für permanent regelnde System (zum Beispiel Abstandsregelautomat oder Spurhalteassistenten) nicht durchführbar. Der Vorteil dieser Methodik liegt in der absoluten Reproduzierbarkeit einer Szene. Diese kann mit verschiedenen Ansätzen zur Bildverarbeitung und Situationsanalyse getestet werden, um vergleichen zu können, wie das System jeweils in der Szene im Online-Betrieb reagiert hätte.

## B.3 Simulation

In der Simulation werden die Algorithmen aus der Entwicklungsumgebung zunächst automatisiert umgeschrieben (im sogenannten *Wrapper*), sodass sie anschließend in der Simulationsumgebung zur Verfügung stehen. In dieser Umgebung können verschiedene Sen-

---

<sup>96</sup>Eine geringe Einschränkung kann sich durch die Rechenzeit ergeben, da im Offline-Betrieb jedes aufgezeichnete Bildpaar verarbeitet wird. Im Online-Betrieb kann es durch Schwankungen in der Rechenzeit dazu kommen, dass einzelne Bildpaare übersprungen werden.

sormodelle zum Einsatz kommen, welche aus einer künstlich erstellten Szene Sensordaten generieren. Dabei können sowohl Öffnungswinkel und Reichweite als auch andere Charakteristika (Zykluszeit etc.) der Sensorik berücksichtigt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit die künstlichen, idealen Sensordaten mit beliebigen Rauschsignalen zu überlagern (siehe Kapitel 6) und so das Verhalten des Systems bei nicht-idealen Sensordaten zu testen.

Die Szenen für die Simulation werden in einer Konfigurationsdatei parametrisiert und anschließend eingelesen. Die Ergebnisse des Systems werden wie in der Nachsimulation in einer Log-Datei gespeichert.



# C Fußgänger-Szenen

## C.1 Positive Szenen

### Szene

$p\_lon\_v_{ego}\_l/m/r$

### Beschreibung

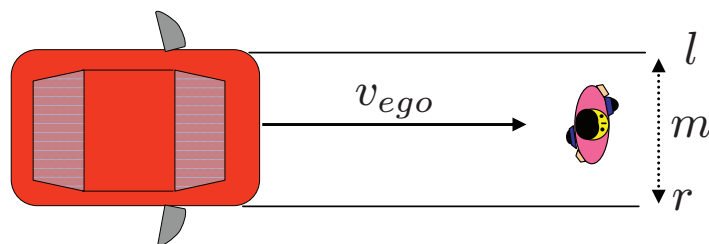
Der Fußgänger steht auf der Fahrbahn und kollidiert mit dem Fahrzeug.

### Parameter

Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$

Position der Kollision am Fahrzeug  $l/m/r$

### Skizze



## Szene

$p\_lat\_v_{ego\_}v_{ped\_}l/m/r$

## Beschreibung

Der Fußgänger will die Fahrbahn überqueren und kollidiert dabei mit dem Fahrzeug.

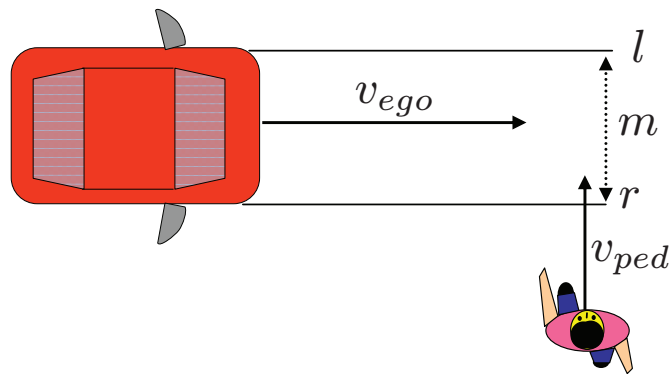
## Parameter

Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$

Fußgängergeschwindigkeit  $v_{ped}$

Position der Kollision am Fahrzeug  $l/m/r$

## Skizze





## Szene

$p\_lat\_v_{ego\_}v_{ped\_}a_{ped\_}l/m/r$

## Beschreibung

Der Fußgänger will die Fahrbahn überqueren, beschleunigt dabei und kollidiert mit dem Fahrzeug.

## Parameter

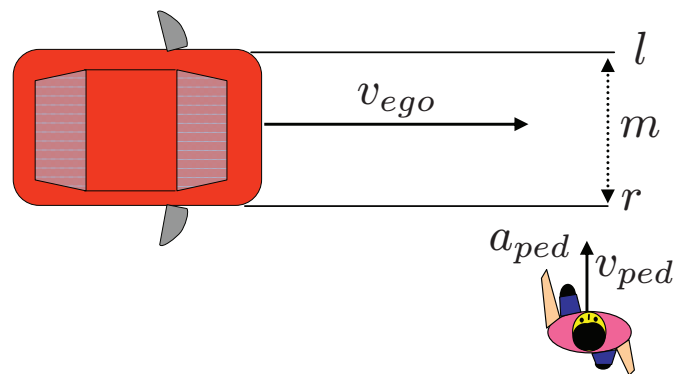
Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$

Fußgängergeschwindigkeit  $v_{ped}$

Fußgängerbeschleunigung  $a_{ped}$

Position der Kollision am Fahrzeug  $l/m/r$

## Skizze



## C.2 Negative Szenen

### Szene

$n\_lon\_pass\_v_{ego}\_d$

### Beschreibung

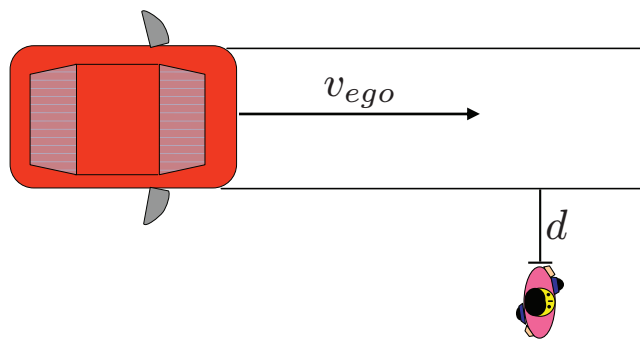
Der Fußgänger steht neben der Fahrbahn.

### Parameter

Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$

Abstand des Fußgängers zum Fahrkorridor  $d$

### Skizze



## Szene

n\_lat\_pass\_ $v_{ego}$ \_ $v_{ped}$ \_ $a_{ped}$ \_ $dx$

## Beschreibung

Der Fußgänger überquert vor dem Fahrzeug die Fahrbahn.

## Parameter

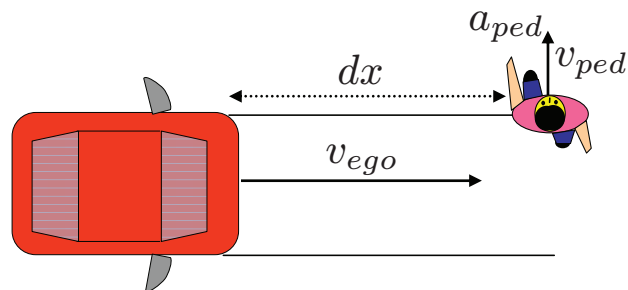
Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$

Fußgängergeschwindigkeit  $v_{ped}$

Fußgängerbeschleunigung  $a_{ped}$

Abstand des Fußgängers zum Fahrzeug beim Heraustreten aus dem Fahrkorridor  $dx$

## Skizze



## Szene

n\_lat\_stop\_  $v_{ego}$   $v_{ped}$   $a_{ped}$   $d$

## Beschreibung

Der Fußgänger hält vor dem Überqueren der Fahrbahn an.

## Parameter

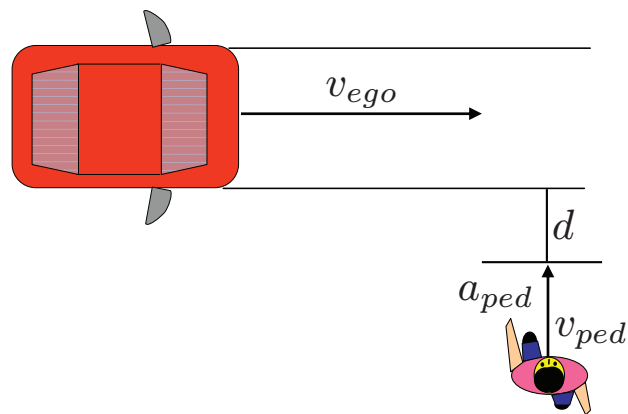
Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$

Fußgängergeschwindigkeit  $v_{ped}$

Fußgängerbeschleunigung  $a_{ped}$

Abstand des Fußgängers zum Fahrkorridor beim Anhalten  $d$

## Skizze



## Szene

$n\_fp\_v_{ego}$

## Beschreibung

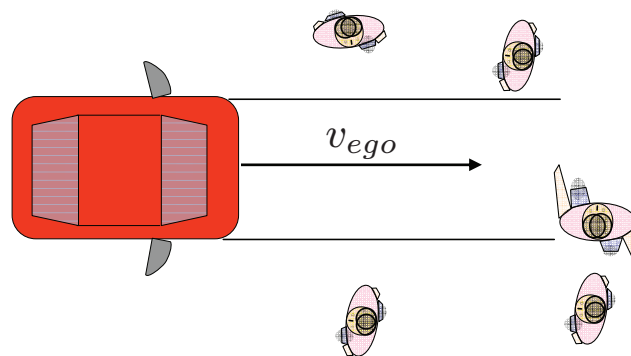
Vom System wird ein beliebiges Objekt fälschlicherweise als Fußgänger erkannt.

## Parameter

Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{ego}$

Position, Geschwindigkeit, Dauer des auftretenden False Positive

## Skizze





# Literaturverzeichnis

- Ahlgrimm J et al. (2009) Fußgängerunfälle. In: Burg H und Moser A (Hg.) Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, Vieweg+Teubner, S. 347–382
- Aktiv (2011) Online Portal. URL <http://www.aktiv-online.org>. 21.02.2011
- Antonini G und Bierlaire M (2006) Capturing interactions in pedestrian walking behavior in a discrete choice framework. Proceedings of the 6th Swiss Transport Research Conference
- Appel H et al. (2002) Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Vieweg+Teubner
- Barrios J et al. (2009) Evaluation of the Effectiveness of Pedestrian Protection Systems through in-depth Accident Investigation, Reconstruction and Simulation. Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV)
- Bäumler H (2007a) Reaktionszeiten im Straßenverkehr - Teil 1. VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 45(11):300–307
- Bäumler H (2007b) Reaktionszeiten im Straßenverkehr - Teil 2. VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 45(12):334–340
- Bäumler H (2008) Reaktionszeiten im Straßenverkehr - Teil 3. VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 46(1):22–27
- Belhaoua A et al. (2010) Error Evaluation in a Stereovision-Based 3D Reconstruction System. EURASIP Journal on Image and Video Processing 2010(1):539836
- Blostein S und Huang T (1987) Error analysis on stereo determination of 3-D point positions. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell 9(6):752–765
- Branz W et al. (2011) Forschungsprojekt AKTIV-AS, Schlussbericht Teilprojekt SFR - Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer. Techn. Ber.
- Burckhardt M (1991) Fahrwerktechnik, Bremsdynamik und PKW-Bremsanlagen. Vogel
- Burg H et al. (2009) Kollisionsmechanik. In: Burg H und Moser A (Hg.) Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion, Vieweg+Teubner, S. 261–345

- Coué C et al. (2006) Bayesian Occupancy Filtering for Multitarget Tracking: An Automotive Application. *The International Journal of Robotics Research* 25(1):19–30
- Dang T (2007) Kontinuierliche Selbstkalibrierung von Stereokameras. Dissertation, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)
- Darms M et al. (2009) Development of a Pedestrian Collision Warning System by Sensor Fusion of Monocular Camera and Millimeter Wave Radar. *Beiträge zum 10 Braunschweiger Symposium für Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme, AAET S.* 150–167
- De Nicolao G et al. (2002) A collision risk assessment approach as a basis for the on-board warning generation in cars. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicle Symposium* 2:436–441
- De Nicolao G et al. (2007) Onboard Sensor-Based Collision Risk Assessment to Improve Pedestrians' Safety. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 56(5):2405–2413
- Donate A et al. (2008) Efficient and accurate subpixel path based stereo matching. *Proceedings of the 19th International Conference on Pattern Recognition* S. 1–4
- Ebel S et al. (2009) Wie sicher ist sicher genug? - Anforderungen an die funktionale Unzulänglichkeit von Fahrerassistenzsystemen in Anlehnung an das gesellschaftlich akzeptierte Risiko. *Tagungsband 6 Workshop Fahrerassistenzsysteme, Karlsruhe*
- Eberhardt W und Himbert G (1977) Bewegungsgeschwindigkeiten, Ergebnisse nichtmotorisierter Verkehrsteilnehmer. Eigenverlag
- Färber B und Maurer M (2005) Nutzer- und Nutzen-Parameter von Collision Warning und Collision Mitigation Systemen. *Tagungsband 3 Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2005, Walting*
- Frank PM (1990) Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: A survey and some new results. *Automatica* 26(3):459–474
- Fröming R et al. (2006) Bewertung des Beitrages unterschiedlicher Fahrerassistenzstrategien zum Fußgängerschutz. *Tagungsband 22 Internationale VDI/VW-Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme, Wolfsburg*
- Fuerstenberg K (2005) Pedestrian protection using laserscanners. *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* S. 437–442
- Fugger TF et al. (2000) Analysis of Pedestrian Gait and Perception-Reaction at signal-controlled Crosswalk Intersections. *Transportation Research Record* 1705:20–25



- Gandhi T und Trivedi M (2006) Pedestrian collision avoidance systems: a survey of computer vision based recent studies. Proceedings of the 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems S. 976–981
- Gandhi T und Trivedi M (2007) Pedestrian Protection Systems: Issues, Survey, and Challenges. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 8(3):413–430
- Gandhi T und Trivedi M (2008) Image based estimation of pedestrian orientation for improving path prediction. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV '08 S. 506–511
- Gietinger K (2006) Opfer der Motorisierung - Versuch einer konkreten Schätzung. Internationales Verkehrswesen 11/06
- Hannawald L und Kauer F (2004) Equal effectiveness study on pedestrian protection. Techn. Ber., Technische Universität Dresden
- Hein H (1994) Messungen von Fussgängergeschwindigkeiten und-beschleunigungen. Diplomarbeit, Fachhochschule München
- Helbing D (1992) A Fluid Dynamic Model for the Movement of Pedestrians. Complex Systems 6:391–415
- Hillenbrand J (2007) Fahrerassistenz zur Kollisionsvermeidung. Dissertation, Universität Karlsruhe
- Hörnlein T (2010) Boosted Feature Generation for Classification Problems Involving High Numbers of Inputs and Classes. Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Inomata Y et al. (2009) Development of the POP-UP Engine Hood for Pedestrian Head Protection. Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV)
- Invent (2011) Online Portal. URL <http://www.invent-online.de>. 21.02.2011
- Irtad (2011) International Traffic Safety Data and Analysis Group. URL <http://internationaltransportforum.org/irtad/index.html>. 07.03.2011
- Jahard F et al. (1997) Far/Near Infrared Adapted Pyramid-Based Fusion for Automotive Night Vision. Proceedings of the sixth International Conference on Image Processing and Its Applications 2:886–890
- Klette R et al. (2009) Discrete Driver Assistance. Mathematical Morphology and Its Application to Signal and Image Processing 5720:1–12
- Knoblauch R et al. (1996) Field Studies of Pedestrian Walking Speed and Start-Up Time. Transportation Research Record 1538:27–38

- Knoll P und Schäfer BJ (2005) Predictive Safety Systems - Steps Towards Collision Avoidance and Collision Mitigation. In: Advanced Microsystems for Automotive Applications, Springer, S. 85–96
- Koornstra M et al. (2003) Transport Safety Performance in the EU a Statistical Overview. Techn. Ber., European Transport Safety Council
- Kozyreff M (2008) A new generation of Night Vision systems: Pedestrian Detection and Warning. Proceedings of the 32nd FISITA World Automotive Congress
- Kretz T und Schreckenberg M (2006) F.A.S.T. - Floor field- and Agent-based Simulation Tool. Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation
- Kuchar JK und Yang LC (2000) A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 1:179–189
- Kühn M et al. (2007) Fußgängerschutz: Unfallgeschehen, Fahrzeuggestaltung, Testverfahren. Springer
- Lee D (1976) A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. Perception 5(4):437–459
- Li F et al. (2003) Accuracy Improvement in Camera Calibration. Techn. Ber., CITR, The University of Auckland, New Zealand
- Matthies L und Shafer SA (1987) Error modeling in stereo navigation. IEEE Journal of Robotics and Automation 3(3):239–248
- McCarthy M und Simmons I (2005) Active Pedestrian Protection. Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)
- Meinecke M et al. (2007) Unfallanalyse und Funktionsspezifikation (AP1000). Techn. Ber., Forschungsprojekt AKTIV - AS, Sicherheit für Fußgänger und Radfahrer
- Meinecke M et al. (2010) Motion Model Estimation for Pedestrians in Street-Crossing Scenarios. Proceedings of the 7th International Workshop on Intelligent Transportation, WIT
- Mitschke M und Wallentowitz H (2004) Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer
- Miura J und Shirai Y (1997) Vision and Motion Planning for a Mobile Robot under Uncertainty. International Journal of Robotics Research 16(6):806–825
- Morales S et al. (2008) An in depth robustness evaluation of stereo algorithms on long stereo sequences. Techn. Ber., University of Auckland
- Morales S et al. (2009) A Study on Stereo and Motion Data Accuracy for a Moving Platform. Advances in Robotics 5744:292–300

- Munder S et al. (2005) SAVE-U Deliverable 22: Driver Warning and Vehicle Actuator Concepts. Techn. Ber., EU-Project SAVE-U
- Nguyen TN (2010) Aktive Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit für Fußgänger. Beiträge zum 11 Braunschweiger Symposium für Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme, AAET
- Nolting W (1989) Grundkurs: Theoretische Physik - Klassische Mechanik. Zimmermann-Neufang
- Petersen J (2011) Verkehrsunfallaufnahme-Portal. URL [www.unfallaufnahme.info](http://www.unfallaufnahme.info). 21.02.2011
- Propedes (2011) Online Portal. URL <http://www.strategiekreis-elektromobilitaet.de/public/projekte/propedes>. 21.02.2011
- Racelogic (2011a) Betriebsanleitung Racelogic VBox III. URL [http://www.racelogic.co.uk/\\_downloads/vbox/Manuals/Data\\_Loggers/RLVB3\\_Manual%20-%20German.pdf](http://www.racelogic.co.uk/_downloads/vbox/Manuals/Data_Loggers/RLVB3_Manual%20-%20German.pdf). 21.02.2011
- Racelogic (2011b) A Comparison of non-contact speed sensors. URL [http://www.racelogic.co.uk/\\_downloads/vbox/Application\\_Notes/Comparison%20of%20Non-contact%20Speed%20Sensors.pdf](http://www.racelogic.co.uk/_downloads/vbox/Application_Notes/Comparison%20of%20Non-contact%20Speed%20Sensors.pdf). 21.02.2011
- Rodgers C und Blomberg R (2008) Field Testing of a Pedestrian Alert System (PAS). Proceedings of the 2008 National Technical Meeting of The Institute of Navigation S. 549–560
- Rodgers C et al. (2002) Design and Testing of a Pedestrian Alert System (PAS). Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation S. 409–420
- Rodgers C et al. (2004) Design, Simulation, & Testing of a Pedestrian Alert System (PAS). Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation S. 2447–2457
- Rosén E und Sander U (2009) Pedestrian fatality risk as a function of car impact speed. Accident Analysis and Prevention 41(3):536–542
- Rosén E et al. (2010) Pedestrian injury mitigation by autonomous braking. Accident Analysis and Prevention 42(6):1949–1957
- Safespot (2011) Online Portal. URL <http://www.safespot-eu.org>. 21.02.2011
- Save-U (2011) Online Portal. URL <http://www.save-u.org>. 21.02.2011

- Scherf O et al. (2008) Optimaler Fußgängerschutz durch situationsgerechte Einschätzung der Fußgängerbewegung. Berichte der 24 VDI/VW Gemeinschaftstagung Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenz
- Schiele B und Wojek C (2009) Kamerabasierte Fußgängerdetektion. In: Handbuch der Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner, S. 223–236
- Schmidt S et al. (2008) Geht er oder geht er nicht? - Ein FAS zur Vorhersage von Fußgängerabsichten. Workshop Fahrerassistenzsysteme, Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe eV S. 176–184
- Serrano L et al. (2004) A GPS Velocity Sensor: How Accurate Can It Be? A First Look. Proceedings of the 2004 National Technical Meeting of The Institute of Navigation S. 875–885
- Shashua A et al. (2004) Pedestrian Detection for Driving Assistance Systems: Single-frame Classification and System Level Performance. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium S. 1–6
- Shashua A et al. (2010) Stereo-Assist: Top-down Stereo for Driver Assistance Systems. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium S. 723–730
- Sohnke T (2010) Methode zur PreCrash-Erkennung im Kfz-Umfeld durch Einsatz aktiver Abstandssensoren. Dissertation, Universität Karlsruhe
- Stiller C (2005) Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung, Springer, S. 1–20
- Stiller C et al. (2009) Maschinelles Sehen. In: Handbuch der Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner, S. 198–222
- Tiemann N et al. (2009) Predictive Pedestrian Protection - Sensor Requirements and Risk Assessment. Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference (ESV)
- Tiemann N et al. (2010a) Predictive Pedestrian Protection - Situation Analysis with a Pedestrian Motion Model. Proceedings of the 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC)
- Tiemann N et al. (2010b) Situation Analysis for Vulnerable Road User Protection using a Pedestrian Motion Model. Proceedings of the 10th International Symposium and Exhibition on Sophisticated Car Occupant Safety Systems (Airbag 2010)
- Tsai R (1987) A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. IEEE Journal of Robotics and Automation 3(4):323–344

- Vaughan R und Bain J (2001) Speeds and Accelerations of School Children. Road and Transport Research 10(3):28–36
- Wakim C et al. (2004a) Design of pedestrian detection systems for the prediction of car-to-pedestrian accidents. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems S. 696–701
- Wakim C et al. (2004b) A Markovian model of pedestrian behavior. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 4:4028–4033
- Watchover (2011) Online Portal. URL <http://www.watchover-eu.org>. 21.02.2011
- Wei G und Ma S (1994) Implicit and Explicit Camera Calibration: Theory and Experiments. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 16(5):469–480
- Weng J et al. (1992) Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(10):965–980
- WHO - World Health Organisation (2011) Road safety: a public health issue. URL [http://www.who.int/features/2004/road\\_safety/en/index.html](http://www.who.int/features/2004/road_safety/en/index.html). 05.03.2011
- Winner H (2009) Frontalkollisionsschutzsysteme. In: Handbuch der Fahrerassistenzsysteme, Vieweg+Teubner, S. 522–542
- Zhang J et al. (2006) On the Relativistic Doppler Effect for Precise Velocity Determination using GPS. Journal Of Geodesy 80(2):104–110